

Полностью поглощающий одномерный фотонный кристалл

© Е.Ю. Шампаров

РГУ им. А. Н. Косыгина,
117997 Москва, Россия
e-mail: shamparov-eu@rguk.ru

Поступила в редакцию 09.11.2021 г.
В окончательной редакции 02.01.2022 г.
Принята к публикации 09.04.2022 г.

Исследована резонансная поглощающая способность одномерного фотонного кристалла, взаимосвязь резонансной частоты и ширины полосы поглощения с составом и толщиной формирующих его слоев. Изучены частотные осцилляции отражения излучения от 2.5-слойных пленочных структур полуметалл-диэлектрик-металл, обусловленные интерференцией на толщине пленки. Измерены инфракрасные спектры отражения образцов пленок из $\text{Bi}_{87}\text{Sb}_{13}$ на зеркально полированных подложках с отражающим слоем металла (Al, Ti) и слоем диэлектрика ($\text{MgF}_2 + \text{LiF}$ или $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$). Разработаны образцы, поглощающие в максимуме до 99.5% излучения и интегрально до 60% резонансного теплового излучения. Оптимизирован состав структур для сопряжения с кремниевыми технологиями и построения матриц чувствительных болометрических приемников. Предложена реализация систем активного избирательного тепловидения с согласованием источника и приемника излучения одновременно по частоте и по частотной полосе. Показана аналогия поглощающих свойств пленочных структур и свойств клеток человеческого глаза.

Ключевые слова: висмут, пленка, ИК, интерференция, цветовая чувствительность глаза.

DOI: 10.21883/OS.2022.08.52901.2907-22

Введение

Освоение дальнего инфракрасного (терагерцового) диапазона электромагнитного излучения является для физики задачей первостепенной важности. Главным недостатком современной терагерцовой техники является отсутствие простых и доступных решений. Эта работа посвящена построению тонкопленочных резонансно поглощающих излучение структур, которые могут быть очень полезны для создания эффективных приемников, источников или фильтров ИК и терагерцового излучения с заданной полосой поглощения.

Рассмотрим поглощение тонкой (сравнимой с длиной волны толщиной d_1) пленки вещества с показателями преломления n_1 и поглощения k_1 ($n_1 - 1 \gg k_1$) на практически полностью отражающей зеркальной металлической плоской поверхности. Пусть на пленку нормально поверхности падает волна с длиной λ

$$E = \exp(2\pi i x / \lambda), \quad (1)$$

амплитуду которой для простоты положим равной 1. Коэффициенты отражения и пропускания (по амплитуде) на границе свободное пространство — бесконечная среда [1]

$$r_1 \approx (n_1 - 1) / (n_1 + 1), \quad t_1 = \sqrt{1 - r_1^2}. \quad (2)$$

Пусть от границы вглубь пленки распространяется волна с амплитудой a , из глубины пленки подходит к границе волна с амплитудой b и отражается от границы волна с амплитудой r . Тогда

$$a = t_1 - br_1, \quad r = r_1 + bt_1,$$

$$b = a \exp(4\pi i n_1 d_1 / \lambda) \exp(-4\pi k_1 d_1 / \lambda) = \alpha a. \quad (3)$$

Резонансу поглощения в пленке соответствует условие, когда прошедшая сквозь пленку волна выходит в противофазе с отраженной —

$$\exp(4\pi i n_1 d_1 / \lambda) = -1, \quad d_1 = (-1 + 2N)\lambda / (4n_1), \quad (4)$$

где N — номер максимума поглощения.

Найдем, при каких n_1 и k_1 в первом максимуме поглощения вся мощность поглотится в пленке. Из (3)

$$r = (r_1 + \alpha) / (1 + r_1 \alpha). \quad (5)$$

Так как $r = 0$, то

$$r_1 = \exp(-\pi k_1 / n_1), \quad k_1 \approx (n_1 / \pi) \ln((n_1 + 1) / (n_1 - 1)). \quad (6)$$

При больших n_1 k_1 убывает и быстро приближается к $2/\pi \approx 0.6366$. $n_1 - 1 = k_1$ при $k_1 \approx 0.7267$.

Подбор вещества для поглощающей пленки затруднителен. Для диэлектриков характерно малое поглощение ($k_1 \ll 1$). Для металлов — одновременно большие n_1 и k_1 [1]. Лучше подходят проводники с невысокой проводимостью. Однако, как правило, это сплавы, состав которых сложно контролировать, формируя из них тонкие пленки. Из чистых веществ наиболее перспективен являющийся полуметаллом висмут. Из него формируют тонкие пленки с предсказуемыми характеристиками [2–4]. При этом, как показано в одной из наших недавних работ [5], его показатель преломления в ИК диапазоне составляет около 9.5, а показатель поглощения — 1.2. Даже в случае висмута показатель поглощения слишком велик.

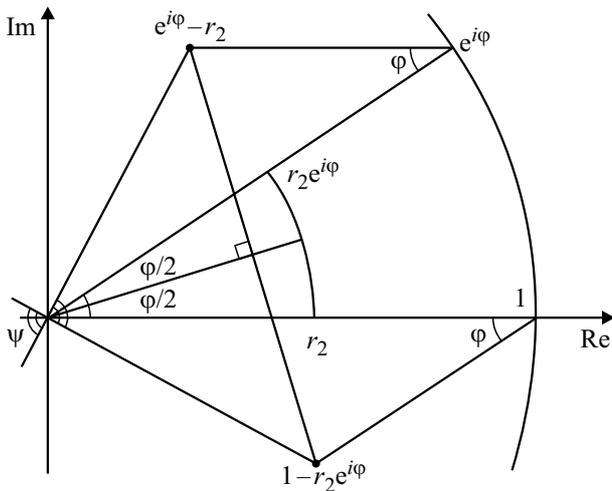


Рис. 1. Определение фазового множителя.

Теперь рассмотрим, каким образом можно модифицировать поглощающую способность пленочной структуры, добавив в нее еще один слой. Логика подсказывает, что к слою плохого проводника со слишком большими n_1 и k_1 необходимо добавить слой диэлектрика (толщиной d_2) с малыми n_2 и k_2 . Для простоты положим $n_1 \gg n_2$ и $k_2 = 0$ и рассмотрим структуру полуметалл–диэлектрик–металл. Тогда, учитывая (1)–(3), (5), коэффициент отражения от структуры

$$r = (r_1 + \alpha\beta)/(1 + r_1\alpha\beta), \tag{7}$$

где

$$\beta = (\exp(i\varphi) - r_2)/(1 - r_2 \exp(i\varphi)), \tag{8}$$

$$\varphi = 4\pi n_2 d_2/\lambda, \quad r_2 \approx (n_1 - n_2)/(n_1 + n_2).$$

Так как в диэлектрике нет поглощения, то β — это всего лишь фазовый множитель $|\beta| = 1$,

$$\beta = \exp(i\psi). \tag{9}$$

То, как можно оценить величину угла ψ , иллюстрирует рис. 1. На комплексной плоскости отложены равные по модулю числитель и знаменатель дроби, частное которых равно β (8). Угол ψ — это сдвиг фазы между этими числителем и знаменателем. Несложно заметить, что

$$\tan\left(\frac{\psi}{2}\right) = \frac{(\exp(i\varphi) - r_2 - 1 + r_2 \exp(i\varphi))}{(\exp(i\varphi) - r_2 + 1 - r_2 \exp(i\varphi))} = \frac{(1 + r_2)(\exp(i\varphi) - 1)}{(1 - r_2)(\exp(i\varphi) + 1)} = \frac{n_1}{n_2} \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right). \tag{10}$$

В диапазоне от 0 до π угол ψ монотонно возрастает в зависимости от φ . Увеличивая толщину слоя, мы лишь добавляем сдвиг фазы волны. Условие резонанса поглощения (см. (4)):

$$\exp(i\psi + 4\pi n_1 d_1/\lambda) = -1,$$

$$d_1 = (-1 - \psi/\pi + 2N)\lambda/(4n_1). \tag{11}$$

Первому интерференционному максимуму поглощения соответствует толщина

$$d_1 = (1 - \psi/\pi)\lambda/(4n_1). \tag{12}$$

Резонансу соответствует набор пар толщин слоев. Увеличение одной компенсирует уменьшение другой. Полному поглощению в структуре соответствует показатель поглощения

$$k_1 \approx (n_1/(\pi - \psi)) \ln((n_1 + 1)/(n_1 - 1)) \approx 2/(\pi - \psi). \tag{13}$$

Таким образом, при данной длине волны излучения, меняя толщину второго слоя d_2 , можно выбрать соответствующие полному поглощению (значению k_1) значения отношения d_2/λ и ψ (8), (10). Этой толщине второго слоя соответствует единственное значение толщины d_1 первого слоя (12). При данной длине волны есть единственная пара толщин слоев структуры полуметалл–диэлектрик–металл, для которой в первом максимуме поглощения будет полным.

Эксперимент

В качестве верхнего (основного поглощающего) слоя лучше брать полуметалл с показателем преломления k_1 максимально близким к $2/\pi$. Поэтому мы взяли не просто висмут, а висмут с добавлением сурьмы. При необходимости не уменьшить, а увеличить концентрацию носителей заряда висмут легируют примесями олова или теллура [6,7]. Как известно [8], висмут и сурьма образуют ряд твердых растворов с любым содержанием компонентов. Атомы висмута и сурьмы свободно замещают друг друга, не разрушая кристаллическую структуру. Добавление сурьмы уменьшает перекрытие валентной зоны и зоны проводимости. Композиты $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ проявляют полупроводниковые свойства. При комнатной температуре минимум проводимости композита наблюдается, когда атомарная доля сурьмы составляет 13%. Примерно при этом содержании минимальным должен быть и показатель преломления. Поэтому состав $\text{Bi}_{87}\text{Sb}_{13}$ мы использовали для приготовления верхнего слоя структуры.

Пленки формировали посредством вакуумного термического напыления смеси особо чистых (10^{-5}) висмута и сурьмы в высоком вакууме с вольфрамовой лодочки на подогретую до 110°C подложку. Надо отметить, что висмут и сурьма имеют близкие значения давления насыщенного пара при температуре распыления ($700\text{--}800^\circ$). Поэтому содержание компонентов получается равномерным по всему объему пленки. Композиты $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ так же, как и сам висмут, имеют слоистую кристаллическую структуру [4–9]. Атомы в слоях связаны намного крепче, чем слои между собой. Зеркально гладкая подложка, на которую производили напыление, оказывает на рост кристаллов висмута ориентирующее

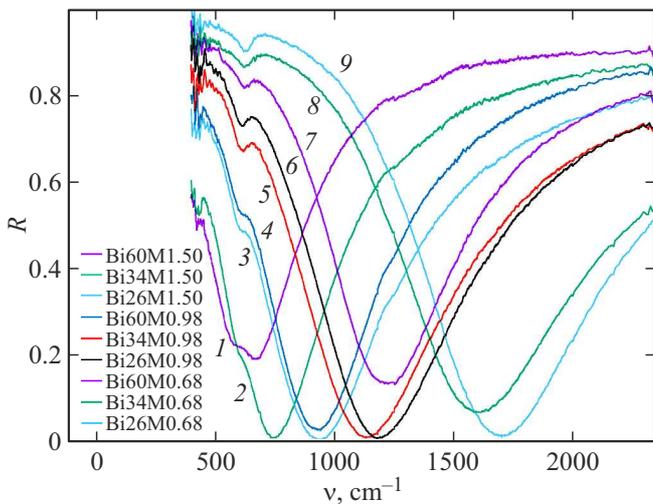


Рис. 2. Спектры отражения структур $\text{Bi}_{87}\text{Sb}_{13}-(\text{MgF}_2 + \text{LiF})-\text{Al}$: 1 — $\text{Bi}_{60}\text{M}_{1.50}$, 2 — $\text{Bi}_{34}\text{M}_{1.50}$, 3 — $\text{Bi}_{26}\text{M}_{1.50}$, 4 — $\text{Bi}_{60}\text{M}_{0.98}$, 5 — $\text{Bi}_{34}\text{M}_{0.98}$, 6 — $\text{Bi}_{26}\text{M}_{0.98}$, 7 — $\text{Bi}_{60}\text{M}_{0.68}$, 8 — $\text{Bi}_{34}\text{M}_{0.68}$, 9 — $\text{Bi}_{26}\text{M}_{0.68}$.

действие. Кристаллические слои растут параллельно поверхности подложки. При используемой температуре кристаллиты оказываются ориентированными не только перпендикулярно плоскости подложки, но и в плоскости подложки [4,10]. Дальний порядок распространяется не только на область отдельного кристаллита, но и на масштаб всей пленки, а отдельные кристаллиты связаны между собой характерным для висмута двойникованием.

Подложками, на которых формировали поглотители излучения, служили зеркально гладкие пластины полированного монокристаллического кремния. На каждую из них напылили отражающий слой чистого алюминия. В первой представленной серии измерений (рис. 2) основным материалом второго диэлектрического слоя выбрали фтористый магний MgF_2 . Это химически инертный прозрачный оптический материал с хорошо изученными свойствами. В диапазоне обратных длин волн ν от 1000 до 4000 cm^{-1} его показатель преломления растет с 1.2 до 1.37 [11] согласно аппроксимирующей формуле $n_2 \approx 1.38 - 380^2 / (\nu 120)^2$. Он имеет невысокую температуру распыления ($\sim 1000^\circ\text{C}$) и удобен для приготовления пленок заданной толщины. Для придания аморфности и соответственно однородности пленки по толщине вместе с фтористым магнием (80%) распылили фтористый литий LiF (20%), имеющий примерно ту же температуру распыления и сходные оптические характеристики. Фториды металлов подобно оксидам прекрасно смешиваются, образуя фторидные стекла.

Измерения инфракрасных спектров отражения структур в диапазоне ν от 400 до 4000 cm^{-1} ($25-2.5\text{ }\mu\text{m}$) выполнены с помощью спектрометра прямого действия Shimadzu IR460. Использовали специальную вставку, входящую в комплектацию прибора. Юстировку положения образца и заменяющего его зеркала с отража-

щим золотым покрытием осуществляли по максимуму сигнала с приемника. Для получения спектра отражения результаты измерения для отражения от образца поточно делили на результаты измерения для отражения от зеркала.

На завершающем этапе этих измерений сделали серию из девяти образцов с толщиной „висмута“ 26, 34 и 60 nm и толщиной „фтористого магния“ 0.68, 0.98 и $1.50\text{ }\mu\text{m}$. На каждом шаге приготовления качество пленок можно было легко проконтролировать визуально благодаря прекрасному зеркальному отражению. Рассеяние излучения структурами пренебрежимо мало, а сумма отражения и поглощения равна 1.

Видно, что результаты измерений находятся в хорошем согласии с теоретическими предположениями. Для пяти из представленных образцов резонансное поглощение составляет от 98.3 до 99.5%. При этом обратная длина волны резонансного поглощения составляет от 730 до 1700 cm^{-1} . Кривые резонансного поглощения имеют плавную повторяющуюся от измерения к измерению форму благодаря тому, что и у $\text{Bi}_{87}\text{Sb}_{13}$, и у $(\text{MgF}_2 + \text{LiF})$ оптические характеристики изменяются монотонно без резких особенностей. Лишь на краю рабочего диапазона спектрометра при 650 cm^{-1} видна линия поглощения фтористого магния, составляющего при толщине пленки $0.68\text{ }\mu\text{m}$ около 10%. Поглощающие свойства структур заведомо обусловлены их строением.

Разберем детально характеристики структур 26/1.50, 26/0.98, 26/0.68, резонансное поглощение которых наиболее близко к 1 (99.5, 98.8 и 98.3%). Их резонансные обратные длины волн — 935 , 1180 и 1700 cm^{-1} . Показатель преломления фтористого магния при этом составляет 1.16, 1.25 и 1.32. Соответственно на толщине диэлектрика набегает сдвиг фазы φ — 2.04, 1.81 и 1.92 rad . При этом слой диэлектрика (согласно (10), полагая $\langle n_1 \rangle = 6.6$) добавляет сдвиг фазы ψ — 2.93, 2.85 и 2.86 rad . Тогда из (12) можно оценить показатель преломления $\text{Bi}_{87}\text{Sb}_{13}$ — $n_1 \approx 7.0$, 7.7 и 5.0. Полученное значение показателя преломления несколько ниже, чем мы ожидали. Вероятно, это связано с тем, что значительная доля мощности поглощается не в „висмуте“, а во „фтористом магнии“. Значительная ошибка измерений вызвана еще и малой точностью ($\sim 5\%$), с которой нам известна толщина слоев структур.

Несмотря на значительные количественные расхождения, получили полное качественное согласие экспериментально полученных результатов с теоретическими предсказаниями. Прекрасно виден и непрерывный набор пар толщин слоев структуры, соответствующий резонансу поглощения, и единственная пара толщин, соответствующая полному поглощению. Простота и понятность принципов формирования позволили сравнительно легко подобрать такие пары толщин и построить полностью поглощающий одномерный фотонный кристалл.

Отметим еще одну очень важную особенность полученных структур. Когда толщина верхнего слоя структуры мала и сдвиг фазы в слое диэлектрика ψ бли-

зок к 2π , согласно (8), (10), набег фазы во всей структуре очень медленно меняется в зависимости от длины волны излучения. В результате в наших структурах есть исключительно широкая область высокого поглощения. Например, для структуры 26/1.50 нижняя и верхняя границы полосы поглощения составляют 600 и 1400 см^{-1} . Ширина спектра поглощения структур сравнима с шириной спектра излучения черного тела. При температуре 300 К максимум спектральной плотности излучения черного тела соответствует обратной длине волны около 590 см^{-1} , а нижняя и верхняя границы излучаемой полосы — 240 и 1130 см^{-1} . Отношение ширины полосы к обратной длине волны в максимуме от температуры излучения черного тела не зависит и составляет примерно 1.5 . Тот же параметр для структуры 26/1.50 равен 0.85 . Ей соответствует резонансная температура излучения 475 К . Интегральный коэффициент поглощения структурой резонансного теплового излучения равен 56% . При настолько большом поглощении структуры полуметалл–диэлектрик–металл очень перспективны для работы в качестве болометрических приемников теплового излучения.

По закону Кирхгофа для теплового излучения коэффициент поглощения поверхности тела равен его светимости. Соответственно те же самые эффективно поглощающие излучение структуры одновременно могут служить и столь же эффективными излучателями. Структуры подходят для построения активных систем тепловидения с согласованием излучателя и приемника одновременно по резонансной частоте и по частотной полосе. Добавим, что электрическое сопротивление $\text{Bi}_{87}\text{Sb}_{13}$ значительно изменяется с температурой. Измеренный нами при температурах от -20 до $+20^\circ\text{С}$ тепловой коэффициент сопротивления $\text{Bi}_{87}\text{Sb}_{13}$ пленки $d(\ln(R_e))/d(T) = -0.0045\text{ К}^{-1}$ [12]. Верхний слой структуры может сразу же служить еще и терморезистором, регистрирующим поглощенную мощность.

В болометрических приемниках для чувствительной регистрации падающего излучения необходимо обеспечить тепловую изоляцию приемного элемента от окружающей среды. В нашем случае пленочную структуру надо отделить от подложки, в которую уходит тепло.

Есть технология формирования пленочных окошек на монокристаллической кремниевой пластине. На поверхность пластины наносят последовательно несколько слоев то оксида, то нитрида кремния с заданной толщиной. Затем с обратной стороны в соответствии с ориентацией монокристалла по стандартной технологии формируют матрицу прямоугольных открытых мест. После этого направленным травлением сквозь эти места кремний удаляют и получают матрицу сквозных прямоугольных тонкопленочных окошек.

Мы смоделировали соответствующую структуру и измерили ее отражение. Сначала на пластину нанесли защитный слой нитрида кремния толщиной 70 нм . После этого посредством магнетронного напыления нанесли слой титана толщиной 80 нм , достаточно толстый,

чтобы практически полностью отразить инфракрасное излучение. Затем еще раз нанесли слой нитрида кремния толщиной 70 нм . После этого нанесли слой поликремния, который во влажной кислородной среде окислили до оксида кремния SiO_2 . Толщина слоя — 340 нм . Затем снова нанесли слой нитрида кремния толщиной 70 нм . Суммарная толщина оксид-нитридной пленки $0.48\text{ }\mu\text{м}$. После этого по описанной выше технологии на части пластины нанесли слои $\text{Bi}_{87}\text{Sb}_{13}$ толщиной 40 , 60 и 100 нм . Спектры отражения оксид-нитридной пленки на титане и трех 2.5-слойных структур представлены на рис. 3.

Как и в случае со структурами с фтористым магнием, образцы обладают хорошим зеркальным отражением. Рассеянием излучения образцами можно пренебречь. В отличие от $(\text{MgF}_2 + \text{LiF})$ диэлектрик $(\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4)$ имеет примерно вдвое больший коэффициент преломления и в три-четыре раза большее поглощение. Видны три линии сильного поглощения при 800 , 1050 и 1250 см^{-1} . Но даже для самой сильной из них поглощение в пленке достигает лишь 43% . Среднее по всему диапазону спектрометра поглощение в ней составляет 16% . Максимальное поглощение в 2.5-слойных структурах близко к 1 , и для структур с толщиной $\text{Bi}_{87}\text{Sb}_{13}$ 40 , 60 и 100 нм составляет соответственно 98.4 , 99.1 и 92.5% при обратной длине волны 1480 , 1160 и 940 см^{-1} . Резонанс поглощения в структуре накладывается на поглощение в диэлектрике, что несколько усложняет измерения. Тем не менее можно сказать, что структурам соответствует резонансная температура излучения около 680 , 560 и 480 К и интегральный коэффициент поглощения 58 , 56 и 54% . Несмотря на заметное поглощение излучения в слое диэлектрика, структуры столь же эффективны для избирательной широкополосной регистрации теплового излучения. Состав диэлектрического слоя полностью

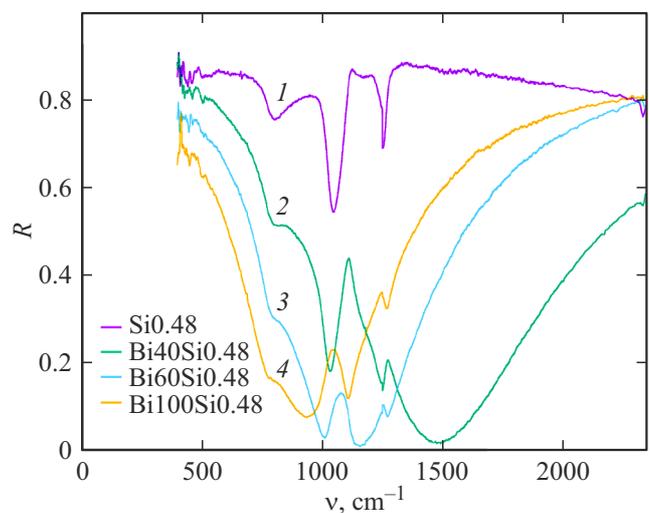


Рис. 3. Спектры отражения структур $\text{Bi}_{87}\text{Sb}_{13}$ — $(\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4)$ –Ti: 1 — $\text{Si}_{0.48}$, 2 — $\text{Bi}_{40}\text{Si}_{0.48}$, 3 — $\text{Bi}_{60}\text{Si}_{0.48}$, 4 — $\text{Bi}_{100}\text{Si}_{0.48}$.

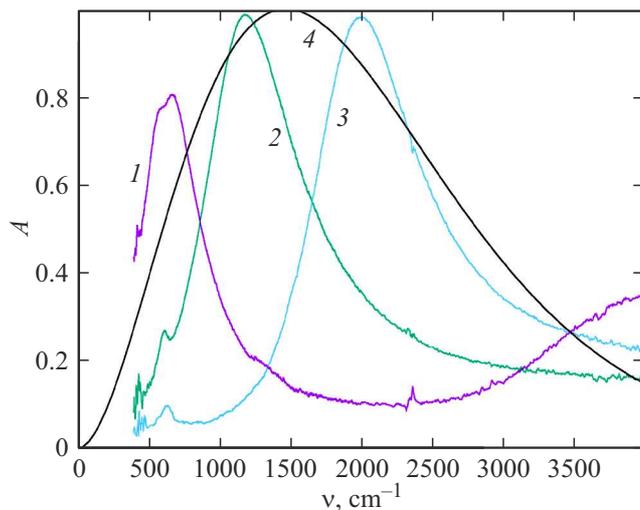


Рис. 4. Спектры поглощения структур (на Al): 1 — Bi60M1.50, 2 — Bi26M0.98, 3 — Bi26M0.52, 4 — спектр излучения черного тела с температурой 750 К.

соответствует составу слоев, из которых формируют окошки на кремниевых пластинах.

Разработанные 2.5-слойные структуры имеют высокую механическую прочность, очень высокую химическую инертность. После трех лет хранения в комнатных условиях спектр поглощения структуры 26/1.50 никак не изменился, и резонансный коэффициент поглощения по-прежнему составил 99.5%.

Заключение

Таким образом, обоснованы теоретически и подтверждены на практике принципы построения резонансно полностью поглощающей электромагнитное излучение 2.5-слойной тонкопленочной структуры полуметалл–диэлектрик–металл. Объяснено, как формировать структуры с широким спектром поглощения. Представлены 7 структур с резонансной обратной длиной волны от 730 до 1700 cm^{-1} , в максимуме поглощающие не менее 98.3% излучения и имеющие интегральный коэффициент поглощения резонансного теплового излучения от 55 до 60%. Описано устройство согласованной по частоте и частотной полосе системы активного тепловидения. Подтверждена сочетаемость на одной подложке (в одном чипе) матрицы чувствительных болометрических приемников с поглощающими структурами и элементов усиления и обработки принимаемого сигнала.

Структуры полуметалл–диэлектрик–металл обладают сразу набором необходимых для эффективной тепловой прямо-передачи свойств — широкой полосой и полным резонансным поглощением, согласованием светимости и поглощения, широким углом зрения, высоким тепловым коэффициентом электросопротивления

верхнего изолированного от подложки слоя, малой толщиной и теплоемкостью единицы площади структуры. По нашим оценкам благодаря такому сочетанию на их основе возможно создание неохлаждаемых систем избирательного активного тепловидения в диапазоне длин волн излучения от 10 и по крайней мере до 80 μm . Полагаем, сравнительная простота, надежность и долговечность конструкции, необременительность эксплуатации и невысокая стоимость предлагаемых устройств будут полезны для освоения дальнего инфракрасного (терагерцового) диапазона. Надеемся, построенные на базе описанных структур приборы найдут техническое применение.

Приложение для биофизики

Полученные в статье результаты можно применить для возможного объяснения природы цветовой чувствительности человеческого глаза. Полагаем наиболее вероятным, что каждая цветочувствительная клетка работает именно как микроболометр, реагируя на поглощаемую мощность благодаря изменению своей температуры. Спектральной избирательностью поглощения обладает пленочная структура на поверхности клетки, подобная той, что описана выше в этой работе. Для обоснования этого утверждения приведем ряд известных фактов и набор физических и логических доводов.

В глазу есть две системы зрения — дневная и ночная, и для каждой из них есть соответствующие клетки — „колбочки“ и „палочки“. В ночное время освещенность мала, поэтому зрение оптимизировано на максимальную чувствительность, которую дает химическая регистрация излучения. Фотохимическую реакцию характеризует красная граница и широкополосный прием при всех более высоких частотах излучения. Поэтому ночное зрение является черно-белым. Заметим, что вещества, отвечающие за спектрально избирательное поглощение, до сих пор не обнаружены. Полагаем, что таковых веществ не существует. В дневное время освещенность, наоборот, велика. Её, чтобы не обжечь сетчатку, приходится даже ограничивать, сокращая площадь зрачка. Поэтому в дневное время чувствительностью можно жертвовать ради расширения динамического диапазона, большего быстродействия и спектральной избирательности. Конечно, регистрирующий тепловое действие света приём многократно менее чувствителен, но при наличии ночного зрения чувствительность не так уж и нужна.

Быстродействие болометра определяет скорость его остывания. Время релаксации температуры, составляющее около 0.1 с, вполне соответствует объекту микронных размеров в водной среде.

Поверхность клетки — это пленка. Поэтому построение резонансно поглощающей пленочной структуры с точки зрения эволюции не является непосильной задачей. Необходимо лишь ряд мутаций, закрепляющий сначала высокое поглощение поверхности при тепловой

чувствительности клетки. Это уже очевидное эволюционное преимущество, обусловленное высоким быстродействием. Затем еще ряд мутаций, закрепляющий направленность приема излучения и спектральную избирательность. На рис. 4 проиллюстрирована аналогия поглощающих свойств исследованных нами пленочных структур и свойств цветочувствительных клеток глаза.

Представлены спектры поглощения трех одинаковых по составу и отличающихся только толщиной слоев структур. При температуре излучения 750 К этот набор спектрально избирательных поглотителей обеспечивает примерно такое же трехцветное видение, как у глаза в видимом диапазоне (6000 К). Для первой структуры одновременно видны первый и второй максимумы поглощения. Последний обеспечивает замыкание „цветового круга“. При отсутствии дисперсии частота второго максимума поглощения (4) втрое больше частоты первого, что соответствует началу и концу видимого диапазона.

И напоследок несколько слов о „колбочках“. Для формирования волны с той же амплитудой и противоположной фазой волне, отраженной от внешней границы структуры (выполнения условия резонансного поглощения), в наших структурах есть третий отражающий металлический слой. Однако известно, что живые организмы металлов не синтезируют. В органической резонансной пленочной поглощающей структуре должно быть полное внутреннее отражение от оптически менее плотного глубокого слоя. Тогда для выполнения условия резонансного поглощения свет должен падать на пленку под определенным достаточно большим углом. Наилучшей формой для поглощающей поверхности при этом является конус с осью вдоль направления падающего света. Именно такую форму „колбочки“ и имеют. Она оптимальна для направленного спектрально избирательного резонансного поглощения. Кроме этого, она обеспечивает большую теплоотдачу и соответственно высокое быстродействие.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Л.А. Вайнштейн. Электромагнитные волны (Радио и связь, М., 1988).
- [2] В.М. Грабов, Е.В. Демидов, В.А. Комаров. ФТТ, **50** (7), 1312 (2008). [V.M. Grabov, E.V. Demidov, V.A. Komarov. Phys.Solid State, **50** (7), 1365 (2008)].
- [3] В.М. Грабов, Е.В. Демидов, В.А. Комаров, М.М. Климантов. ФТТ, **51** (4), 800 (2009). [V.M. Grabov, E.V. Demidov, V.A. Komarov, M.M. Klimantov. Phys. Solid State, **51** (4), 846 (2009)].
- [4] В.М. Грабов, Е.В. Демидов, В.А. Комаров. ФТТ, **52** (6), 1219 (2010). [V.M. Grabov, E.V. Demidov, V.A. Komarov. Phys. Solid State, **52** (6), 1298 (2010)].
- [5] Е.Ю. Шампаров, А.Л. Бугримов, С.В. Родэ, И.Н. Жагрина. Опт. и спектр., **130** (7), 1120 (2022).
- [6] В.М. Грабов, Н.П. Степанов. ФТП, **35** (2), 155 (2001). [V.M. Grabov, N.P. Stepanov. Semiconductors. **35** (2), 149 (2001)].
- [7] В.М. Грабов, Е.В. Демидов, В.А. Комаров, Д.Ю. Матвеев, А.А. Николаева, Д. Маркушевс, Е.В. Константинов, Е.Е. Константинова. ФТП, **48** (5), 648 (2014). [V.M. Grabov, E.V. Demidov, V.A. Komarov, D.Yu. Matveev, A.A. Nikolaeva, D. Markushevs, E.V. Konstantinov, E.E. Konstantinova. Semiconductors, **48** (5), 648 (2014)].
- [8] C.Y. Teo Jeffrey, Fu Liang, C.L. Kane. Phys. Rev. B, **78**, 045426 (2008). DOI: 10.1103/PhysRevB.78.045426
- [9] M.Z. Hasan, C.L.Kane. Rev. Mod. Phys., **82**, 3045 (2010).
- [10] В.М. Грабов, Е.В. Демидов, Е.К. Иванова, В.А. Комаров, Н.С. Каблукова, А.Н. Крушельницкий, М.В. Старицын. ЖТФ, **87** (7), 1071 (2017). [V.M. Grabov, E.V. Demidov, E. K. Ivanova, V.A. Komarov, N.S. Kablukova, A.N. Krushel'nitskii, M.V. Staritsyn. Technical Physics. **87** (7), 1087 (2017)].
- [11] Зверев В.А., Кривоустова Е.В., Точилина Т.В. Оптические материалы. Ч. 2 Учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов (СПб НИУ ИТМО, СПб., 2013).
- [12] Шампаров Е.Ю. Патент на изобретение РФ № 2583345. Трехслойное тонкопленочное покрытие, широкополосно резонансно поглощающее инфракрасное излучение и обладающее высокой тепловой чувствительностью. 2016.