

Высокочувствительный субмиллиметровый фотоприемник на основе InSb

© Ю.Б. Васильев[¶], А.А. Усикова, Н.Д. Ильинская, П.В. Петров, Ю.Л. Иванов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 25 декабря 2007 г. Принята к печати 29 декабря 2007 г.)

Исследована субмиллиметровая фотопроводимость электронного газа в объемном InSb. Предложена новая конструкция InSb-фотоприемника в виде плоских спиралей, в которых соотношение длины полосы к ее ширине составляет 2 порядка. Такая конструкция позволяет создавать очень чувствительные приемники с возможностью перестройки пика чувствительности магнитным полем.

PACS: 71.55.Eq, 72.40.+w, 71.70.Di

Недостатком существующих терагерцовых приемников на основе объемных кристаллических полупроводников InSb является их относительно низкая чувствительность по сравнению с кремниевыми болометрами и германиевыми фотоприемниками на основе фототермической ионизации мелких примесей [1]. Низкая чувствительность InSb-приемников является следствием того, что даже при низких температурах ($T = 4.2$ К) образцы разумных размеров остаются слишком низкоомными, поскольку энергия ионизации примесей очень мала. Увеличение сопротивления приборов и их чувствительности возможно за счет использования для их изготовления наиболее чистых материалов (с концентрацией примесей меньше 10^{14} см⁻³ и подвижностью около 10^6 см²/В·с) (при 77 К) [2]. Уменьшение концентрации примесей сильно ограничено возможностями современных технологий. Известен и применяется метод увеличения сопротивления (и соответственно чувствительности) за счет дозированной компенсации донорных примесей в InSb акцепторами [3]. Как было установлено, при степени компенсации, равной 0.3, при гелиевых температурах электроны находятся в потенциальных ямах флуктуаций кулоновского потенциала ниже порога протекания. Под действием излучения электроны разогреваются и оказываются выше порога протекания. Такие приемники InSb обладают более высокой чувствительностью в отсутствие магнитного поля в широкой спектральной области, но не могут использоваться в качестве селективных детекторов на основе циклотронного резонанса, поскольку их чувствительность в магнитном поле очень низкая.

Нами предлагаются и исследуются фотоприемники новой конструкции на основе объемных кристаллических полупроводников InSb, в которых увеличено соотношение длины приемника к площади поперечного сечения. Методами фотолитографии из тонкой пластины InSb изготавливается спираль, для которой отношение длины к ширине чувствительного элемента составляет несколько порядков. Обнаружено, что даже образцы с

достаточно высокой концентрацией примесей, составляющей несколько единиц 10^{14} см⁻³, и подвижностью около 10^5 см²/В·с (при 77 К) становятся при гелиевых температурах высокоомными и обладают высокой чувствительностью к терагерцовому излучению.

Технология изготовления приемников состоит в следующем.

Из слитка монокристаллического InSb *n*-типа вырезаются пластины толщиной порядка 1 мм, которые утончаются до 200 микрон шлифовкой. На полученной подложке методом стандартной фотолитографии создается маска из фоторезиста требуемой конфигурации — спираль. Через маску мокрым химическим травлением создается рельеф глубиной до 100 мкм. Затем полученный рельеф защищается воском, и мокрым химическим травлением удаляются 100 мкм подложки до полного вскрытия спирали. Отмывка готового элемента производится в четыреххлористом углероде. Полученная фоточувствительная площадка в виде спирали (рис. 1) приклеивается к пластине из монокристаллического InSb *p*-типа для



Рис. 1. Фоточувствительная площадка.

[¶] E-mail: yu.vasilyev@mail.ioffe.ru

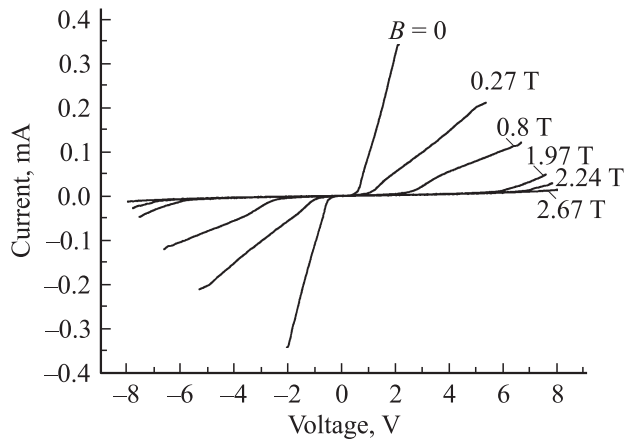


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики фотоприемника InSb при различных магнитных полях.

придания механической прочности конструкции. Точечные контакты изготавливаются из чистого индия. Были изготовлены несколько фотоприемников одинаковой формы из различных слитков монокристаллического InSb *n*-типа с концентрацией носителей $(2-4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью $(1-3) \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (при 77 К). Все они оказались практически идентичными по своим свойствам. В качестве источника излучения использовались образцы монокристаллического германия. При пропускании импульсов тока они излучают либо спонтанное широкополосное излучение, либо в режиме генерации излучают монохроматическое излучение, длина волны которого перестраивается магнитным полем [4]. Все измерения проведены при температуре $T = 4 \text{ К}$. Вольт-амперные характеристики InSb-приемника представлены на рис. 2. Отметим, что даже в отсутствие магнитного поля хорошо видна отсечка по напряжению, т. е. образец находится в высокоомном состоянии при напряжениях, меньших критического. Этот факт позволяет выбрать рабочее напряжение вблизи критического напряжения, так что под действием излучения сопротивление образца претерпевает сильное изменение. С ростом магнитного поля, как видно из рис. 2, сопротивление возрастает и критическое напряжение также растет.

Чувствительность фотоприемника оказалась настолько высокой, что позволила измерить сигнал спонтанного излучения из кристаллов германия, причем соотношение сигнала к шуму составляет несколько порядков. На рис. 3 представлено изменение сигнала фотоприемника в магнитном поле. Поскольку энергия спонтанного излучения соответствует межподзонам переходам в валентной зоне германия в дальней ИК-области, данная зависимость отражает изменение чувствительности фотоприемника с магнитным полем при постоянном значении смещения.

В магнитных полях порядка 1 Т происходит квантование уровней энергии электронов. Это приводит к формированию пика чувствительности, связанного с цик-

лотронным резонансом. На рис. 4 показана зависимость фотопроводимости от магнитного поля при облучении образца монохроматическим излучением. В качестве источника света в этих измерениях использовался *p*-Ge лазер, длина волны генерации которого перестраивается магнитным полем. На рис. 4 приведены результаты измерений при двух энергиях квантов излучения. Видно, что пик фотопроводимости смещается по магнитному полю при изменении частоты генерации лазера и состоит из двух линий, соответствующих циклотронным переходам свободных электронов и электронов, локализованных на примесях [5]. Высокая чувствительность приемника позволила выявить тонкую структуру в спектрах фотопроводимости InSb *n*-типа. Наряду с основным пиком имеются пики, связанные с фотопроводимостью на примесях. Отметим, что амплитуда дополнительных пиков значительно меньше пика циклотронного резонанса, что не препятствует использованию фотоприемника в качестве селективного.

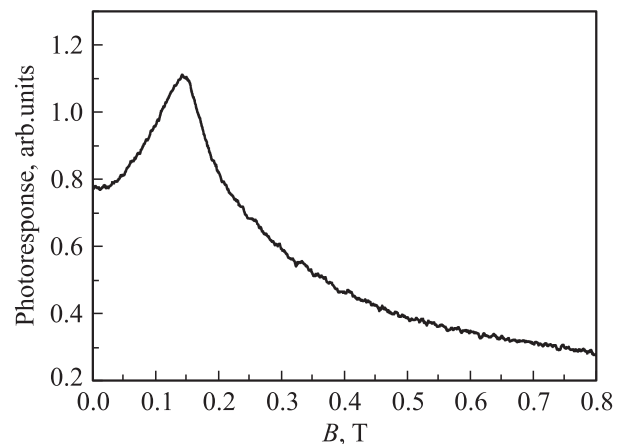


Рис. 3. Зависимость чувствительности фотоприемника от величины магнитного поля.

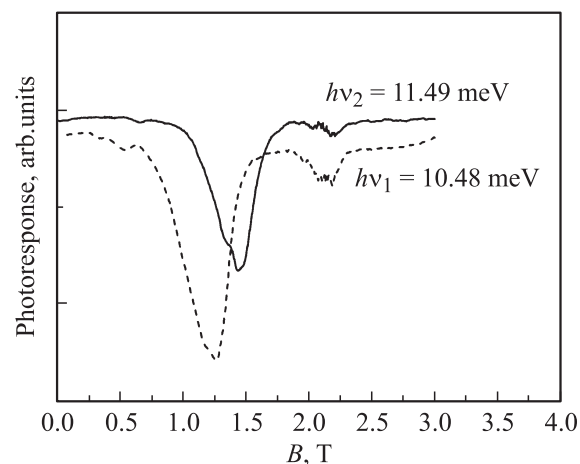


Рис. 4. Изменение фотопроводимости приемника в магнитном поле при облучении монохроматическим излучением с энергией квантов 11.49 и 10.48 мэВ.

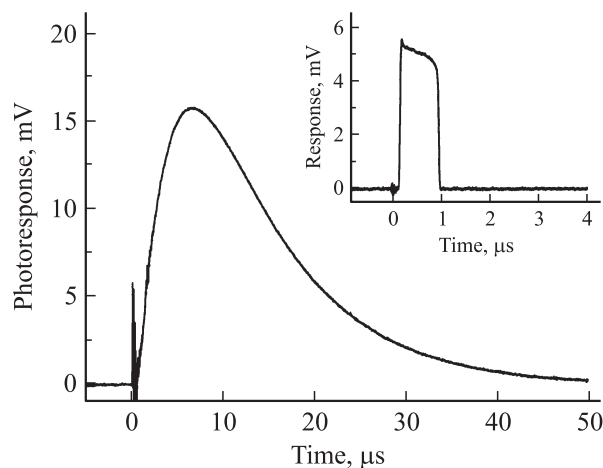


Рис. 5. Осциллограмма импульса фотопроводимости InSb-фотоприемника в максимуме пика чувствительности. Время фотоответа — 10 мкс. На вставке — осциллограмма фотосигнала приемника Ge, легированного Ga ($\tau \approx 20$ нс).

Недостатком значительного увеличения сопротивления структур при спиральной форме фотоприемника можно считать уменьшение его быстродействия. Исследования динамики фотопроводимости показали, что величина фотоответа составляет десять микросекунд при измерении в пике чувствительности приемника. На рис. 5 показано, насколько время фотоответа в InSb превышает время фотоответа в германии, где время фотоответа порядка 20 нс. Измерения вне пика чувствительности InSb показали, что время фотоответа возрастает и составляет десятки микросекунд.

Сравнение фотоприемников традиционной прямоугольной формы и спирального, изготовленного из одного слитка InSb, невозможно, в силу того что прямоугольный фотоприемник не дает никакого фотоответа. Сравнение проводилось с наиболее чувствительными германиевыми фотоприемниками, принцип действия которых основан на фототермической ионизации мелких примесей. По чувствительности оба приемника примерно одного порядка, несмотря на то что германиевый приемник значительно массивней ($5 \times 5 \times 10$ мм), чем спиральный приемник ($0.1 \times 50 \times 0.8$ мм). Быстродействие германиевого приемника значительно лучше. Однако основным достоинством спирального приемника является его селективность: пик чувствительности можно перестраивать в широких пределах с помощью магнитного поля, благодаря малой эффективной массе электронов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 06-02-17214.

Список литературы

- [1] E.H. Putley. *Infrared detectors*, ed. by R.D. Hudson, J.W. Hudson (Halsted Press, 1975) p. 30.
- [2] E.H. Putley. *Appl. Optic*, **4**, 649 (1965).

- [3] А.Н. Выставкин, В.Н. Губанков, В.Н. Листвин, В.В. Мигулин. *ФТП*, **1**, 844 (1967).
- [4] Ю.Л. Иванов, Ю.Б. Васильев. *Письма в ЖТФ*, **10**, 613 (1983).
- [5] E. Gornik. *Lecture Notes in Physics* (Springer-Verlag, 1982) v. 177, p. 248.

Редактор Л.В. Беляков

High sensitive submillimeter InSb photodetector

Yu.B. Vasilyev, A.A. Usikova, N.D. Il'inskaya, P.V. Petrov, Yu.L. Ivanov

loffe Physicotechnical Institute
of the Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Submillimeter photoconductivity has been investigated in bulk InSb. We propose a novel construction of InSb spiral-shaped photodetector with length to width ratio of around 2 orders. Such a construction allows creating very sensitive photodetector with a responsivity peak tunable by magnetic field.