

Заметных количественных изменений в поведении I_Q/I_0 и τ при изменении угла схождения в диапазоне $10-130^\circ$ обнаружено не было. В связи с этим причиной уменьшения τ следует считать нагревание пленки, обусловленное поглощением излучения записывающих пучков. На рис. 4 показана зависимость τ от температуры пленки при постоянном значении $I_0 = 0.1$ мВт/мм². Измерения производились в условиях термостатирования пленки и обеспечения хорошего теплообмена ее поверхности с объемом воздушного термостата.

Из формулы (3) видно, что при $\tau = \text{const}$ зависимость I_Q/I_0 остается линейной в широком диапазоне изменений I_0 . Однако одинаковая степень уменьшения I_Q/I_0 и τ при увеличении I_0 указывает на то, что при $I_0 > \sim 0.1$ мВт/мм² зависимость I_Q/I_0 должна выходить на насыщение. О влиянии насыщения рабочего перехода БР570-М412 на запись голограмм в пленках с БР уже указывалось в [7]. В простейшем случае эффект насыщения можно описать зависимостью фоторефрактивного коэффициента β от I_0 [11]

$$\beta = \beta_0 [1 + I_0/I_n]^{-1}, \quad (4)$$

где I_n — интенсивность насыщения.

На рис. 3 сплошной линией показана зависимость I_Q/I_0 от I_0 , рассчитанная по формуле (3), в которую подставлялись экспериментальные значения τ и значения β , вычисленные по формуле (4) при $I_n = 0.06$ мВт/мм². Хорошее совпадение экспериментальных и рассчитанных значений в широком диапазоне изменения I_0 подтверждает правильность приведенной интерпретации поведения коэффициента β .

Таким образом, полученные в работе результаты показывают, что основным фактором, ограничивающим дифракционную эффективность пленок с БР, является насыщение рабочего перехода ФС. Максимальная дифракционная эффективность фазовых решеток в таких пленках реализуется путем их термостатирования при $t \sim 10^\circ\text{C}$. Уменьшение постоянной времени записи при этом может быть достигнуто дополнительной подсветкой пленки излучением в сильной области спектра [8].

Литература

- [1] Барменков Ю. О., Зосимов В. В., Кожевников Н. М. и др. ДАН СССР, 1986, т. 290, № 5, с. 1095—1098.
- [2] Степанов С. И., Трофимов Г. С. Тез. докл. VI Всес. школы-семинара по оптической обработке информации. Фрунзе, ФПИ, 1986, ч. 2, с. 34—35.
- [3] Hall T. J., Fiddy M. A., Ner M. S. Opt. Lett., 1980, v. 5, N 11, p. 485—487.
- [4] Бондаренко А. Н., Маслов Б. Я., Рудая Б. Б., Троценко В. П. ПТЭ, 1975, № 6, с. 211—213.
- [5] Петров М. П., Степанов С. И., Хоменко А. В. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации. Л.: Наука, 1983. 270 с.
- [6] Грозный А. В., Духовный А. М., Лещев А. А. и др. В кн.: Оптическая голография. Л.: Наука, 1979, с. 92—122.
- [7] Светочувствительные биологические комплексы и оптическая регистрация информации. Сб. научных трудов. Пушкино, ОНТИ НЦВИ АН СССР, 1985. 208 с.
- [8] Барменков Ю. О., Зосимов В. В., Кожевников Н. М. и др. Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, № 5, с. 281—284.
- [9] Вилицкий В. Л., Кухтарев Н. В., Одулов С. Г., Соскин М. С. УФН, 1979, т. 129, с. 113—137.
- [10] Вилицкий В. Л., Кухтарев Н. В., Соскин М. С. Квант. электр., 1977, т. 4, с. 420—425.
- [11] Зельдович Б. Я., Пилипецкий Н. Ф., Шкунов В. В. Обращение волнового фронта. М.: Наука, 1985. 240 с.

Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина

Поступило в Редакцию
25 декабря 1986 г.

Журнал технической физики, т. 58, в. 4, 1988

ФЛЮОРЕСЦЕНЦИЯ И ФОСФОРЕСЦЕНЦИЯ АМОРФНЫХ СЛОЕВ НИТРИДА КРЕМНИЯ

В. В. Васильев, И. П. Михайловский, К. К. Светашев

Наблюдаемый в последнее время интерес к изучению люминесценции аморфного нитрида кремния ($a\text{-Si}_3\text{N}_4$) связан главным образом с необходимостью выяснения электронного спектра локализованных состояний [1—5]. В ряде работ отмечалось, что фотолюминесценция (ФЛ)

α - Si_3N_4 имеет характерные черты ФЛ аморфных полупроводников и халькогенидных стекол: 1) наличие больших стоксовских потерь, составляющих примерно половину ширины запрещенной зоны [1] (максимум зеленой полосы излучения (З-полоса) лежит в области $E_{\text{max}} \sim 2.5$ эВ, $\Delta E \sim 1$ эВ); 2) спектр фотовозбуждения (ФВ) З-полосы имеет максимум в области края фундаментального поглощения ($E \sim 5$ эВ) [1]; 3) наличие эффекта «усталости» при стационарном возбуждении [2]; 4) наблюдение фотондуцированного поглощения [6]; 5) возрастание интенсивности ФЛ при повышении температуры [2]. Вместе с тем механизм ФЛ α - Si_3N_4 , природа центров свечения не выяснены, и для их идентификации в первую очередь необходимо знание кинетических характеристик свечения, данные о которых отсутствуют.

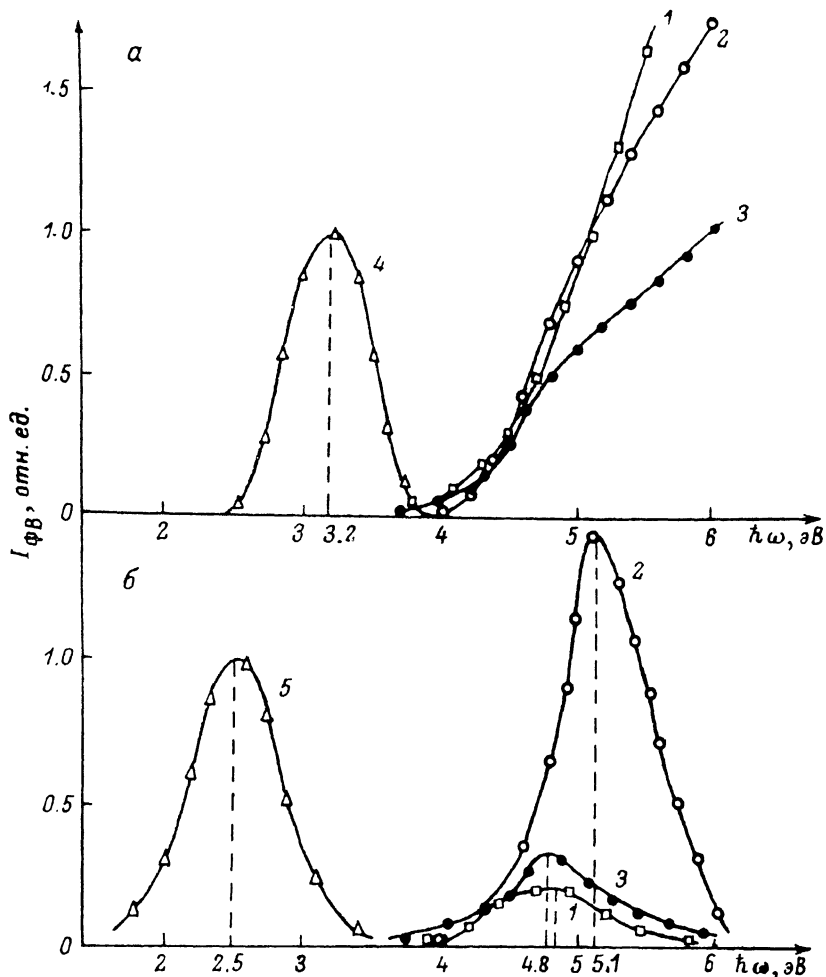


Рис. 1. Спектры ФЛ и ФВ Ф-полосы (а) и З-полосы (б) аморфных пленок нитрида кремния. 1—3 — спектры ФВ (1 — ТХН, 2 — МСВ, 3 — МС образцы α - Si_3N_4); 4, 5 — спектры ФЛ.

В настоящей работе впервые наблюдалось медленное свечение (фосфоресценция) α - Si_3N_4 и показано, что по кинетике свечения полосы ФЛ могут быть разделены на фосфоресцирующую З-полосу и флюоресцирующую Ф-полосу ($E_{\text{max}} \sim 3.2$ эВ, $\Delta E \sim 1$ эВ). Изучение ФЛ α - Si_3N_4 проводилось на образцах, изготовленных различными способами: 1) аммонолизом тетрахлорида кремния в РПД, $\text{NH}_3/\text{SiCl}_4=10$, $T=750^\circ\text{C}$ — ТХН образцы; 2) аммонолизом моносила в реакторе атмосферного давления в потоке водорода, $\text{NH}_3/\text{SiH}_4=100$, $T=890^\circ\text{C}$ — МСВ образцы; 3) аммонолизом моносила в РПД, $\text{NH}_3/\text{SiH}_4=100$, $T=850^\circ\text{C}$ — МС образцы. Слои α - Si_3N_4 толщиной 0.3—0.5 мкм выращивались на кремниевых подложках.

Изучение спектров ФЛ и ФВ проводилось по методике [1]. Изучение кинетических характеристик проводилось с помощью флюориметра LIF-200 и азотного лазера ($\lambda=377$ нм).

Для раздельной регистрации спектров ФЛ и ФВ флюоресценции и фосфоресценции использовались модуляция излучения ФЛ, при которой регистрировалась как медленная, так

и быстрая ФЛ, и модуляция излучения накачки с частотой $2 \cdot 10^3$ Гц. В последнем случае регистрировалась ФЛ с характерными временами послесвечения $\tau \leq 5 \cdot 10^{-4}$ с.

Спектры флюоресценции и фосфоресценции с соответствующими спектрами ФВ приведены на рис. 1, а, б. Флюоресцентная Ф-полоса характеризуется временами послесвечения $\tau \sim 10^{-9}$ с. Эта полоса излучения не имеет максимума в спектре ФВ, непрерывно разгораясь в области края фундаментального поглощения, причем интенсивность излучения обнаруживает зависимость от способа изготовления образцов $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$.

Интенсивность фосфоресцирующей 3-полосы также обнаруживает зависимость от способа изготовления. Кроме того, имеется характерная длительность послесвечения для разных типов образцов: $\tau \approx 10^{-1}$ с для МСВ, $\tau \approx 5 \cdot 10^{-1}$ с для МС, $\tau \approx 10^0$ с для ТХН образцов $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$.

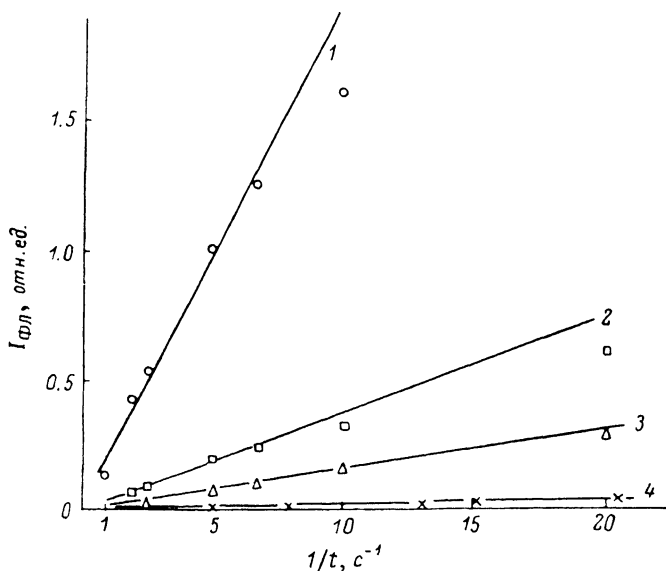


Рис. 2. Зависимость интенсивности послесвечения 3-полосы от времени (ТХН образцы $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$) для $T=77$ (1), 295 (2), 373 (3) и 473 К (4).

Спектры ФВ фосфоресцирующей полосы имеют близкие максимумы в области края фундаментального поглощения, а величина стоковского сдвига составляет $\sim E_g/2$. Изучение времени послесвечения (в максимуме излучения 3-полосы) показало, что в первом приближении затухание при постоянной температуре пропорционально t^{-1} . На рис. 2 приведены зависимости интенсивности послесвечения для различных температур. Необходимо отметить, что температурное тушение во всем температурном интервале ($T=77 \div 473$ К) не может быть описано одним значением энергии активации и, так же как для аморфных полупроводников, наблюдается слабая температурная зависимость в области низких температур [7].

По всей видимости, обнаруженная элементарность полос в спектрах излучения $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ позволяет сразу определить наиболее характерные особенности энергетического спектра запрещенной зоны. Первое, наиболее важное значение должно относиться к наличию дискретного уровня (полосы) в области 3.2 эВ, связанного с существованием Ф-полосы. Оптические переходы через этот уровень возникают как при возбуждении $E_b \leq E_g$, так и при генерации электронно-дырочных пар ($E_b \sim E_g$). Причем этот дискретный уровень характерен для всех разновидностей исследуемых образцов $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$, а отличие их состоит только в интенсивности излучения (рис. 1, а). Природа этого уровня может быть связана с Si—Si дефектом, который, как показано в [8, 9], дает связывающее состояние вблизи потолка валентной зоны, а антисвязывающее отстоит от потолка валентной зоны на 3.0 ± 0.3 эВ.

Вторая особенность связана с наличием уровня (полосы) в середине запрещенной зоны ~ 2.5 эВ. Судя по спектру возбуждения (рис. 1, б), 3-полоса возбуждается эффективно только на краю фундаментального поглощения. Очевидно, с увеличением энергии возбуждения ($E_b > E_g$) происходит пространственное разделение электронно-дырочных пар, что приводит к уменьшению вероятности излучательной рекомбинации. В [2] отмечалось наличие связанных электронно-дырочных пар, что подтверждалось тушением ФЛ при приложении внешнего электрического поля.

Наиболее вероятное объяснение рекомбинационных оптических переходов через середину запрещенной зоны $a\text{-Si}_3\text{N}_4$, как и в случае ФЛ халькогенидных стекол, нельзя найти в рамках простейшей зонной диаграммы, не учитывающей смещения (поляризации) решетки вблизи центров. По всей видимости, также необходимо полагать, что при захвате (освобождении) неравновесных носителей, находящихся в хвостах зон, за счет выделения энергии возможны изменения ближайшего окружения центров, приводящие к возникновению нового, метастабильного состояния вблизи середины запрещенной зоны. Последующая излучательная рекомбинация будет теперь соответствовать энергии $\sim E_g/2$ [7, 10]. Обычно в этом случае при рассмотрении изменения зарядового состояния центров используется модель заряженных центров — D -центров с оборванными связями [10], в соответствии с которой дефект может находиться в трех зарядовых состояниях D^+ , D^- и D^0 , причем полагается, что реакции $2D^0 \rightarrow D^+ + D^-$ является энергетически выгодной (состояние с отрицательной эффективной корреляционной энергией). Неравновесные носители при генерации электронно-дырочных пар захватываются на соответствующие состояния D^+ и D^- , в результате чего образуются метастабильные состояния D^0 в середине запрещенной зоны.

Отметим, что в определенном смысле состояния D^0 действительно метастабильны по отношению к воздействию температуры и облучению. В частности, нами наблюдался отжиг Z -полосы ($T=850^\circ\text{C}$, $t=30$ мин для МСВ и ТХН образцов $a\text{-Si}_3\text{N}_4$) — медленная люминесценция тушилась полностью. А при стационарном возбуждении наблюдается эффект «усталости», как и в [2], который обычно связывают с «выключением» части центров D^0 из рекомбинационного процесса.

Необходимо отметить, что наиболее подходящим кандидатом на роль такого центра в $a\text{-Si}_3\text{N}_4$ следует считать центры Si^0 . Действительно, теоретические расчеты [11] показали, что оборванные связи кремния Si^0 имеют амфотерное состояние вблизи середины запрещенной зоны. Сообщалось также [12], что в исходных образцах (образцы типа МС) был обнаружен ЭПР сигнал, который связывается с оборванными связями кремния.

В таком случае экспериментальным подтверждением предполагаемой модели для объяснения ФЛ Z -полосы будет наблюдение фотоиндуцированного ЭПР сигнала.

Литература

- [1] Vasilev V. V., Mikhailovskii I. P., Svitashv K. K. Phys. Stat. Sol. (a), 1986, v. 95, N 1, p. K37—K42.
- [2] Агафонов А. И., Долгов М. В., Лохныгин В. Д. и др. Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, № 1, с. 10—13.
- [3] Pundur P. A., Shavalgin J. G., Gritsenko V. A. Phys. Stat. Sol. (a), 1986, v. 94, N 2, p. K107—K112.
- [4] Васильев В. В., Михайловский И. П., Эпов А. Е. Микроэлектроника, 1984, т. 13, № 5, с. 474—476.
- [5] Барабан А. П., Коноров П. П., Кричинин С. А. ФТТ, 1985, т. 27, № 1, с. 207—209.
- [6] Есаев Д. Г., Синица С. П. Микроэлектроника, 1984, т. 13, № 5, с. 448—455.
- [7] Фишер Р. В кн.: Аморфные полупроводники / Под ред. Бродски М. М.: Мир, 1982, с. 201—237.
- [8] Lieske N., Hezel R. Thin Solid Films, 1979, v. 61, N 2, p. 217—228.
- [9] Kärcher R., Ley L., Johnson R. L. Phys. Rev. B, 1984, v. 30, N 4, p. 1896—1910.
- [10] Street R. A. Advances in Physics, 1976, v. 25, N 4, p. 397—454.
- [11] Robertson J., Powell M. J. Appl. Phys. Lett., 1984, v. 44, N 4, p. 415—417.
- [12] Fujita S., Sasaki A. J. Electrochem. Soc., 1985, v. 132, N 2, p. 398—402.

Институт физики полупроводников
СО АН СССР
Новосибирск

Поступило в Редакцию
26 декабря 1986 г.

Журнал технической физики, т. 58, в. 4, 1988

ПОГОННЫЙ ИМПЕДАНС ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Г. А. Вугальтер, М. Б. Рогожина, Б. Н. Гусев, А. Г. Гуревич

При исследовании бегущих спиновых (магнитоэлектрических) волн в магнитных пленках необходимо знать погонный импеданс преобразователей, при помощи которых осуществляется возбуждение и прием таких волн. Расчет этой величины основывается на численном