

06.3;07;12

ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ АНОДИЗИРОВАННОГО ФОСФИДА ГАЛЛИЯ

© А.А.Лебедев, В.Ю.Рудь, Ю.В.Рудь

Фосфид галлия является полупроводником с непрямой запрещенной зоной, ширина которой составляет 2.26 эВ при 300 К [1-4]. Это соединение легко легируется элементами II и VI групп Периодической системы, образуя кристаллы *n*- и *p*-типа проводимости с различной концентрацией свободных носителей заряда и удельным сопротивлением — от полуизолирующих до вырожденных кристаллов. Кристаллы эти находят широкое применение в оптоэлектронике. Анодное травление кремния и других алмазоподобных полупроводников приводит к повышению эффективности излучательной рекомбинации (ИР) и сдвигу — иногда весьма существенному — максимума излучения в коротковолновую сторону [5-8]. В данной работе приведены первые результаты исследований возможности воздействия на излучательные свойства GaP с помощью анодного травления, а не посредством легирования.

В качестве исходных кристаллов для анодного травления использовались электрически однородные пластины GaP с концентрацией свободных электронов $10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при $T = 300 \text{ К}$ и ориентированных в кристаллографической плоскости (100). Анодное травление производилось в среде, образованной 48%-ной плавиковой кислотой, в которую добавлялось от 1 до 2 объемных процентов концентрированной азотной кислоты. Площадь поверхности химически полированных пластин GaP с электролитом составляла $\sim 1 \text{ см}^2$. Плотность тока в процессе электрохимической обработки выбиралась в пределах от 20 до 100 мА/см² при длительности 20-50 мин.

Стационарная фотолюминесценция возбуждалась излучением гелий-кадмиевого лазера ($\hbar\omega_{ex} \simeq 2.82 \text{ эВ}$, плотность излучения $L \simeq 20 \text{ мВт/см}^2$) и регистрировалась с той же стороны пластины, на которую падало возбуждающее излучение. Спектры ИР регистрировались с помощью оптической системы, включающей монохроматор МДР-3 с дифракционной решеткой 600 штрихов/мм и фотоэлектрический умножитель ФЭУ-62. Спектры ИР нормировались с учетом спектральной чувствительности фотодетектора и оптического пропускания измерительного тракта системы.

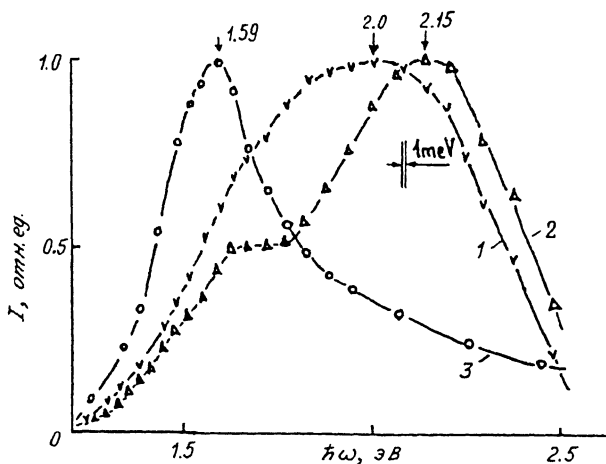


Рис. 1. Нормированные на максимум спектры стационарной излучательной рекомбинации анодизированного слоя (кривые 1 и 2, разные участки возбуждения, диаметр области возбуждения ≈ 4 мм) в сравнении с нетравленным n -GaP (кривая 3) при 300 К. $\hbar\omega_{ex} = 2.82$ эВ.

Как показали исследования по анодному травлению, на поверхности пластин фосфида галлия в области контакта с жидкой средой возникают однородно окрашенные слои желто-оранжевого цвета. Эти слои вместе с подложкой GaP образуют единое целое и выдерживают неоднократное термоциклирование при резких изменениях температуры от 300 до 77 К. При освещении анодированных слоев даже несфокусированным излучением Ne-Ne лазера ($P = 10-15$ мВт) была обнаружена яркая ИР желто-белого цвета, что отражает ее широкий спектральный состав. Под микроскопом микроструктура зоны свечения выглядела достаточно однородной. Однако при сканировании лучом лазера по всей травленной площади интенсивность излучения изменялась, что свидетельствует о локальной неоднородности излучательных свойств анодированных слоев GaP. При переходе возбуждающего луча на нетравленные участки той же пластины GaP визуально свечение не регистрировалось. Объективные измерения показали, что интенсивность ИР травленных участков примерно в 20-30 раз выше, чем нетравленных.

Типичные спектральные зависимости интенсивности ИР при возбуждении двух разных областей анодированного слоя GaP в сравнении с ИР исходной нетравленной области приведены на рис. 1. Видно, что в исходном кристалле ИР наблюдается в широкой спектральной области. Энергети-

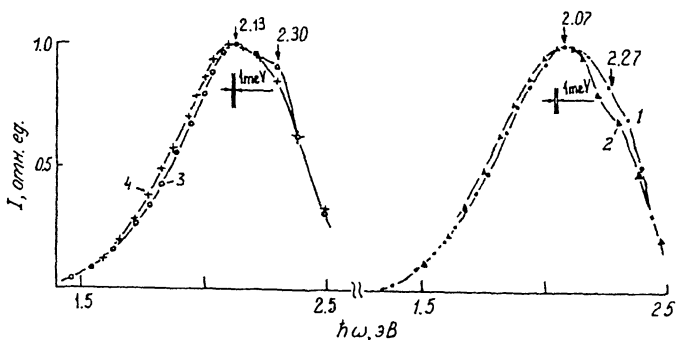


Рис. 2. Нормированные на максимум спектры стационарной ИР анодизированного n -GaP в зависимости от интенсивности возбуждения L/L_0 : кривые 1, 3 — 1, 2, 4 — 0, 1; 1, 2 — при 300 К, 3, 4 — при 80 К.

ческое положение максимума ИР $\hbar\omega_m \approx 1.59$ эВ позволяет отнести его к излучательным переходам с участием глубоких уровней [2,4], тогда как краевая ИР значительно подавлена и ее спектральная зависимость проявляется в виде затянутого бесструктурного спада (рис. 1, кривая 3). В результате травления спектральный диапазон излучательной рекомбинации практически не изменяется, однако энергетическое положение максимума смещается в коротковолновую сторону на 0.6–0.75 эВ в разных областях анодизированного слоя. Это соответствует выводу о неоднородностях в излучательных свойствах анодизированных слоев, для которых максимум излучения попадает в область межзонных переходов в объемных кристаллах GaP [3]. Полосы ИР для анодизированных слоев GaP характеризуются большими значениями их ширины на полувысоте $\delta_{1/2} \approx 600 - 800$ мэВ, что указывает на неэлементарный характер излучательного процесса. Последнее находит подтверждение в данных на рис. 1, кривые 1 и 2. Из них, в частности, следует, что вместо одной широкой полосы в одной области возбуждения (кривая 1) при переходе в другую область (кривая 2) в спектре ИР четко разрешается уже две полосы с максимумами при 1.65 и 2.15 эВ. Возможно, что длинноволновый максимум ИР обусловлен излучением от нетравленной области GaP. Это предположение основано на спектральной близости максимума ИР в исходном (рис. 1, кривая 3) и обработанном в кислотном составе (рис. 1, кривая 1) GaP.

Интенсивность ИР в результате анодного травления воспроизводимо увеличивается. При $T = 300$ К в анодизированных слоях интенсивность ИР возрастает в 25–30 раз по сравнению с нетравленным GaP при энергиях фотонов в окрестности $\hbar\omega \approx 2.0$ эВ. Достижимое при этом возбужде-

ние ИР попадает в область краевого излучения для объемного нетравленного GaP [1-4]. С понижением температуры до 77 К интенсивность ИР анодизированных слоев увеличивается относительно комнатной температуры в 5-10 раз. Из рис. 2 видно, что спектральный контур ИР при снижении температуры изменяется несущественно: полная ширина полосы ИР на ее полувысоте при этом уменьшается от 620 до 560 мэВ, а ее абсолютный максимум и крылья смещаются в коротковолновую сторону со средней скоростью $\approx -2.3 \cdot 10^{-4}$ эВ/К, что близко к температурному коэффициенту изменения ширины запрещенной зоны GaP [2]. С повышением плотности возбуждения ИР на порядок величины L (рис. 2) наблюдается увеличение вклада наиболее коротковолновой составляющей ИР в некоторых из областей анодизированных слоев GaP и происходит смещение крыльев полосы ИР при 77 и 300 К в коротковолновую спектральную область, тогда как энергетическое положение максимума ИР практически не изменяется. Эти особенности в целом не противоречат предположению о донорно-акцепторной природе излучательных процессов в анодизированных слоях GaP. В таком случае можно заключить, что анодное травление GaP вызывает увеличение вероятности образования наноразмерных структур. Тот факт, что энергетическое положение полос ИР в анодизированных слоях GaP попадает в область краевого излучения объемного фосфида галлия, не является поводом для предположения об отсутствии уширения запрещенной зоны.

Список литературы

- [1] Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. М.: Мир, 1973. 465 с.
- [2] Баранский П.И., Ключок В.П., Потыкевич И.В. Полупроводниковая электроника. Справочник. Киев: Наук. думка, 1975. 704 с.
- [3] Мосс Т., Баррел Г., Эллис Б. Полупроводниковая электроника. М.: Мир, 1976. 432 с.
- [4] Милнс А. Примеси с глубокими уровнями. М.: Мир, 1977. 562 с.
- [5] Sanham L.T. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. P. 1046.
- [6] Лебедев А.А., Ременюк А.Д., Рудь Ю.В. // ФТП. 1993. Т. 27. С. 1846.
- [7] Лебедев А.А., Рудь Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 2. С. 80.
- [8] Agekyan V.F., Lebedev A.A., Lebedev A.A., Rud' Yu.V., Stepanov Yu.A. // Abstracts 3-th Intern. Workshop "Expert evaluation and control of compound semiconductor materials and technologies". Freiburg, Germany, 1996. 8. 5.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН
С.-Петербург
Государственный технический
университет
С.-Петербург

Поступило в Редакцию
25 июля 1996 г.