

06;07

## ВИДИМАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

© А.А.Лебедев, Ю.В.Рудь.

В результате анодного травления в растворах  $\text{HF} + \text{HNO}_3$  на поверхности GaAs образуется слой желто-белого цвета. В спектре фотолюминесценции этого слоя наблюдается интенсивная широкая бесструктурная полоса с максимумом при 2.14 эВ при 300 К. Интенсивность излучения в области квазимежзонных переходов в травленных и исходных пластинах GaAs при одинаковых условиях возбуждения значительно ниже.

Обнаружение эффективной видимой фотолюминесценции (ФЛ) в кремнии после анодного травления привело к новому подходу в материаловедении этого классического полупроводника [1-3] и открыло заманчивые перспективы распространения этого явления на другие вещества из числа алмазоподобных полупроводников. Так, вслед за кремнием возможность возникновения эффективной ФЛ в глубине полосы фундаментального поглощения была продемонстрирована на теллуриде кадмия [4]. Многочисленные исследования излучательной рекомбинации в GaAs до сих пор касались только квазимежзонного и примесного излучения в области энергий  $\hbar\omega < E_G$  [5], и только небольшое число сообщений касалось излучательных переходов вблизи, но все же выше  $E_G$ , которые характеризовались низкой квантовой эффективностью [6,7]. В настоящей работе сообщается об обнаружении эффективной ФЛ в видимом спектральном диапазоне в глубине полосы фундаментального поглощения одного из главных представителей полупроводников  $A^3B^5$  — арсенид галлия, подвергнутого химической обработке в условиях протекания тока через границу арсенида галлия с растворами кислот различной концентрации и состава. Обнаруженный эффект может быть использован для расширения спектрального диапазона люминесцентной электроники на GaAs, а также для создания нового типа гетероперехода, в котором широкозонная компонента на подложках из GaAs формируется контролируемым химическим травлением без применения достаточно сложных и дорогих эпитаксиальных технологий для создания слоев на подложках из GaAs.

Анодное травление специально нелегированных, а также легированных примесью Mn объемных монокристаллов и эпитаксиальных слоев GaAs с концентрацией носителей

$10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$  осуществлялось при  $T = 300 \text{ К}$  в 48%-ной плавиковой кислоте с добавлением 1-2 объемных %  $\text{HNO}_3$ . Пластины GaAs имели ориентацию (100) или (111). Плотность тока в процессе химической обработки исходных электрически однородных пластин находилась в пределах 20-100 мА/см<sup>2</sup>. Длительность процессов травления была 20-60 мин, а вариация времени травления позволяла изменять толщину образующихся на исходных пластинах слоев.

Измерение спектров стационарной ФЛ осуществлялось при возбуждении излучением аргонового ( $\hbar\omega_B \simeq 2.4 - 2.7 \text{ эВ}$ , мощность  $\simeq 100 \text{ мВт/см}^2$ ) или гелий-кадмиевого ( $\hbar\omega_B \simeq 2.82 \text{ эВ}$ , мощность  $\simeq 10 \text{ мВт/см}^2$ ) лазеров. Для устранения возможного побочного излучения на выходе лазера помещали оптический фильтр, который пропускал только основное излучение лазера, а на входе монохроматора помещали фильтр, который не пропускал лазерное излучение. ФЛ анализировалась монохроматором МДР-3 с решеткой 600 штрихов/мм и фотоэлектронным умножителем ФЭУ-62. Спектры ФЛ нормировались с учетом спектральной чувствительности фотодетектора и оптического пропускания измерительного тракта установки. Спектральное разрешение для выполненных исследований было не хуже 1 мэВ.

В результате предпринятой химической обработки на поверхности пластин арсенида галлия воспроизводимо образуются оптически однородные слои желто-белого цвета. При возбуждении поверхности этих слоев излучением разных длин волн при комнатной и азотной температурах было обнаружено, как и в перистом кремнии, яркое излучение желто-оранжевого цвета [2]. Изменения длины волны возбуждающего излучения, плотности возбуждения (в пределах 3 порядков) и локализации области возбуждения на поверхности возникающего после анодного травления GaAs слоя цвет излучения практически не изменяли. Зависимость интенсивности ФЛ от интенсивности возбуждения была практически линейной. Микроструктура области свечения была достаточно однородной, а интенсивность излучения — стабильной во времени. В данной работе ФЛ регистрировалась в геометрии "на отражение", поскольку свет излучения лежал в области фундаментального поглощения GaAs. В диапазоне исследованных плотностей возбуждающего излучения видимая ФЛ не обнаруживала каких-либо признаков деградации со временем возбуждения.

На рис. 1 приведены типичные спектральные зависимости ФЛ двух слоев, полученных в разных технологических процессах обработки специально нелегированного  $n$ -GaAs. Видно, что помимо краевого излучения GaAs в спектрах ФЛ после анодного травления возникает широкая бесструктур-

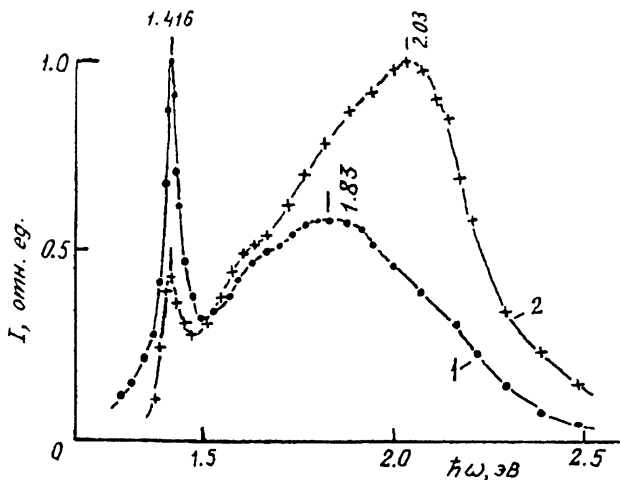


Рис. 1. Спектральные зависимости фотолюминесценции анодизированного  $n$ -GaAs при  $T = 300$  К,  $\hbar\omega_B = 2.7$  эВ. Номера образцов: 1 — 21n, 2 — 37n.

ная полоса, расположенная в глубине фундаментального поглощения GaAs, т. е. при  $\hbar\omega > E_G$ . Характерно, что энергетическое положение узкой полосы квазимежзонного излучения при этом соответствует известному для GaAs [5], а соотношение интенсивностей квазимежзонного излучения и широкой полосы видимого излучения, как и спектральное положение ее максимума, изменяется. Последнее типично для пористого кремния и отражает взаимосвязь свойств ФЛ с размерами образующихся при травлении нанокристаллов [1]. Можно думать, что изменение положения максимума широкой полосы ФЛ для слоев на подложках из GaAs отражает аналогичную взаимосвязь.

На рис. 2 сопоставлены спектры ФЛ одного из типичных слоев на GaAs(Mn) и нетравленного участка этой же пластины. Видно, что до травления спектр ФЛ определяется излучательными переходами электронов из зоны проводимости на акцепторный уровень марганца в GaAs, тогда как в области  $\hbar\omega > E_G$  излучение пренебрежимо мало. В результате травления на подложке GaAs возникает слой, ФЛ которого уже доминирует в глубине фундаментального поглощения GaAs  $\hbar\omega > E_G$ . Возникшее излучение (рис. 2, кривая 1) имеет вид широкой бесструктурной полосы с максимумом при  $\hbar\omega \approx 2.14$  эВ и полной шириной на полувысоте  $\delta_{1/2} \approx 800$  мэВ. Столь высокое значение  $\delta_{1/2}$  может свидетельствовать в пользу неэлементарности излучательных переходов. С повышением температуры до 77 К максимум полосы смещается в коротковолновую область к

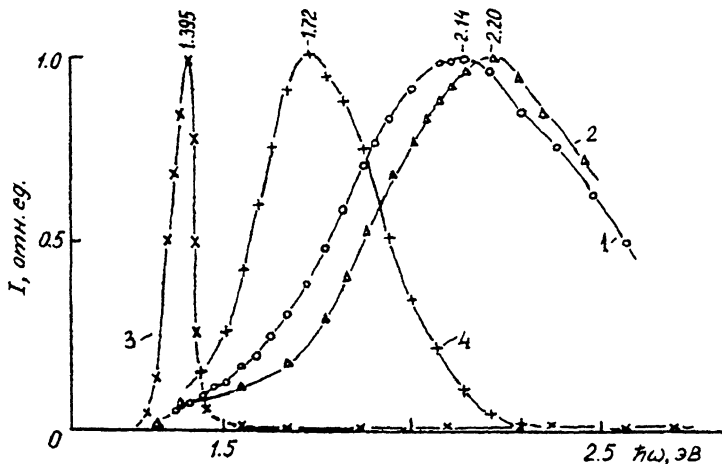


Рис. 2. Спектральные зависимости фотолюминесценции анодизированного  $p$ -GaAs(Mn) (1, 2) и исходного  $p$ -GaAs(Mn) (3) в сравнении с пористым кремнием (4) ( $\hbar\omega_B = 2.82$  эВ;  $T$ , К: 1, 4 — 300; 2, 3 — 77).

$\hbar\omega_m \approx 2.2$  эВ (рис. 2, кривая 2). Это смещение описывается температурным коэффициентом  $\alpha = -2.7 \cdot 10^{-4}$  эВ/К. При понижении  $T$  наблюдается также сужение полосы видимой ФЛ, так что при 77 К  $\delta_{1/2} \approx 600$  мэВ. Наряду с этим уменьшение температуры сопровождается некоторым возгоранием видимой ФЛ (примерно в 2–3 раза). Сравнивая излучательные свойства слоев, полученных анодным травлением Si и GaAs (рис. 2), следует подчеркнуть, что по интенсивности видимая ФЛ слоев на GaAs примерно на порядок уступает по этому параметру лучшим слоям на кремнии. Следовательно, очевидной связи между характером межзонных переходов в исходных для травления полупроводниках не обнаруживается.

Таким образом, анодное травление арсенида галлия приводит к возгоранию в видимой области спектра широкой полосы фотолюминесценции, которая может быть приписана по аналогии с пористым кремнием либо размерному эффекту, либо же образованию пленок, состав которых не отвечает исходному GaAs. Для уточнения природы этого излучения необходимы дополнительные исследования.

С учетом полученных результатов можно ожидать, что обнаруженное явление найдет применение при создании из GaAs люминесцентных источников и фотопреобразователей излучения видимого спектрального диапазона.

Работа выполнена в рамках государственной научно-технической программы "Физика твердотельных наноструктур" и при частичной финансовой поддержке Оризонского университета США.

### Список литературы

- [1] *Sanham L.T.* // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. P. 1046.
- [2] *Лебедев А.А., Ременюк А.Д., Рудь Ю.В.* // ФТП. 1993. Т. 27. С. 1846.
- [3] *Astrova E.V., Belov S.V., Lebedev A.A., Remenyuk A.D., Rud' Yu.V.* // Phys. Low-Dim. Struct. 1994. V. 4/5. P. 47.
- [4] *Лебедев А.А., Рудь Ю.В.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 2. С. 80.
- [5] *Панков Ж.* // Оптические процессы в полупроводниках. М.: Мир, 1973. 456 с.
- [6] *Cusano D., Kingsley J.* // Appl. Phys. Lett. 1965. V. 6. P. 91.
- [7] *Гладких Б.И., Наследов Д.Н., Царенков Б.В.* // ФТП. 1968. Т. 2. С. 635.

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

Поступило в Редакцию  
3 апреля 1996 г.