

Оптоэлектронные явления в слоях, полученных нитрированием GaP и GaAs

© В.Ф. Агекян*, В.И. Иванов–Омский, В.Н. Князевский, В.Ю. Рудь†, Ю.В. Рудь

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

*Санкт-Петербургский государственный университет,
198904 Санкт-Петербург, Россия

†Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 19 февраля 1998 г. Принята к печати 24 февраля 1998 г.)

Плазменной обработкой монокристаллических пластин арсенида и фосфида галлия получены тонкие широкозонные слои. Исследованы спектральные зависимости фотолюминесценции полученных слоев и фоточувствительности структур слой/подложка. Анализ полученных результатов позволяет считать, что разработанный технологический процесс приводит к замещению атомов мышьяка и фосфора на азот и образованию на поверхности указанных полупроводников широкозонных слоев твердых растворов.

Введение

Общеизвестно какое значение приобрели нитриды элементов III-й группы с тех пор как Накамура с сотрудниками продемонстрировали эффективность оптоэлектронных приборов на основе GaN [1]. В качестве подложек для выращивания эпитаксиальных слоев GaN и гетероструктур на его основе часто используются GaAs и GaP. Важным элементом технологии при этом оказывается операция предварительного нитрирования поверхности подложки, проводимая в азотном плазменном разряде. Электронные свойства возникающего при этом переходного слоя недостаточно изучены. В настоящей работе сообщается об изучении фотоэлектрических свойств и фотолюминесценции слоев, которые образовывались на поверхности монокристаллических подложек GaAs и GaP в процессе их обработки в плазме азотного газового разряда по развитой на основании выполненных измерений технологии.

Экспериментальные образцы

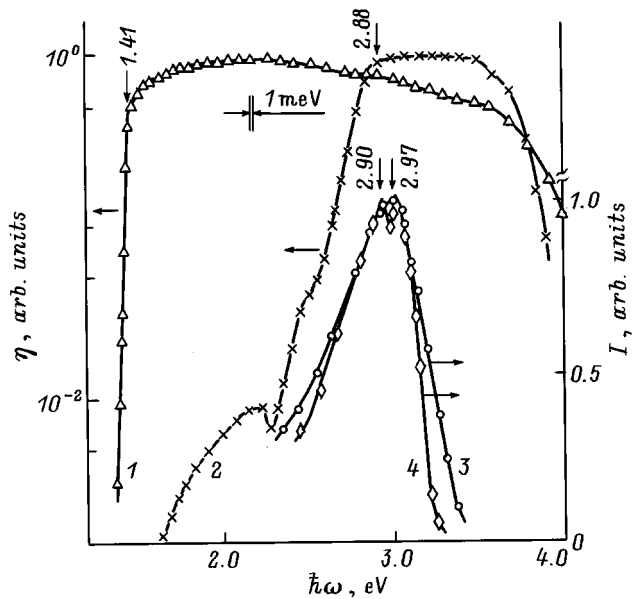
Нитрированию подвергались ориентированные в плоскости (100) монокристаллические пластины n -GaAs и n -GaP с концентрацией свободных электронов $n = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при $T = 300 \text{ К}$. С этой целью пластины помещались в экранированной полости в металлической вакуумной камере с вакуумом порядка $2 \cdot 10^{-6} \text{ Торр}$. На начальном этапе в камеру напускался водород до давлений, допускающих устойчивый газовый разряд на постоянном токе, после чего пластины GaAs или GaP обрабатывались в водородной плазме при температурах около 50°C в течение 5 мин. Вслед за этим камера продувалась азотом и при давлениях около $8 \cdot 10^{-2} \text{ Торр}$ поджигался высокочастотный разряд на частоте 13.6 МГц. Температура пластин поднималась до 500°C и они обрабатывались в течение 20 мин при токе через плазму 30–40 мА.

Фотоэлектрические свойства структур слой/подложка

Непосредственно после создания слоев производились измерения фотоэлектрических свойств приготовленных структур. С этой целью из пластин выкалывались образцы со средними размерами $2 \times 2 \times 0.3 \text{ мм}$. После создания омических контактов к слоям из чистого индия и подложкам из соединений GaAs и GaP структуры монтировались в корпуса серийных диодов.

При освещении таких структур интегральным или монохроматическим сфокусированным (диаметр 0.1 мм) излучением как со стороны слоев, так и со стороны подложек возникает фотовольтаический эффект. Во всех исследованных структурах знак фотонапряжения не зависел от спектрального состава света и энергии падающих фотонов, а также локализации светового зонда на поверхности структур. Это позволяет считать, что разделение фотогенерированных пар обеспечивается единственной активной областью, возникшей в результате формирования слоя на подложках двух различных по составу полупроводниковых соединений. Фоточувствительность таких структур максимальна при их освещении со стороны образовавшихся слоев и для лучших структур достигает 10^4 В/Вт при $T = 300 \text{ К}$.

Типичные спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования, определяемой как отношение фототока короткого замыкания к числу падающих квантов, приведены на рисунке (кривые 1 и 2). Длинноволновая граница фоточувствительности полученных структур определяется веществом подложек. В случае структур слой/GaAs длинноволновый рост квантовой эффективности экспоненциальный, причем его крутизна $s = 40\text{--}50 \text{ эВ}^{-1}$. Спектральное положение длинноволнового края фоточувствительности этих структур может быть связано с прямыми межзонными переходами в арсениде галлия. С ростом энергии фотонов в широкой спектральной области 1.7–2.7 эВ фото-



Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности η гетероконтактов GaAs/слой (1) и GaP/слой (2) при 300 К и фотолуминесценции слоев на GaAs (3) и на GaP (4) при 80 К. Спектры 1 и 2 получены при освещении со стороны слоев.

чувствительность сохраняется практически неизменной, что указывает на низкий уровень оптического поглощения образующимся слоем в указанном спектральном диапазоне, с одной стороны, и на достаточно высокую эффективность разделения фотогенерированных пар в электрическом поле образовавшейся гетерограницы слой/GaAs, с другой стороны. Полная ширина спектров фоточувствительности таких структур на их полувысоте $\delta_{1/2}$ достигает 2.2 эВ. Широкополосный характер фотопреобразования свидетельствует о том, что образующийся слой по отношению к веществу подложки GaAs широкозонный, а интерфейсная область этих структур является достаточно совершенной. Следует отметить, что при освещении этих структур со стороны подложек толщиной 0.3 мм спектр фоточувствительности превращается в узкоселективный ($\delta_{1/2} = 25\text{--}35\text{ мэВ}$) из-за резкого нарастания оптического поглощения с приближением энергии фотонов к ширине запрещенной зоны GaAs.

Для структур слой/GaP (см. рисунок, кривая 2) также проявляется широкополосный характер фоточувствительности при освещении со стороны слоев. Более низкая величина $\delta_{1/2} = 0.9\text{ эВ}$ связана с увеличением относительно GaAs ширины запрещенной зоны GaP, что и вызывает сильное смещение длинноволнового края фоточувствительности гетеропереходов слой/GaP в направлении более высоких энергий фотонов. Спектральный контур длинноволнового края фоточувствительности этих структур определяется поглощением в GaP и является характерным для фотопреобразователей из фосфида галлия [2,3]. Главной особенностью полученных фоточувствительных структур на основе двух

различных бинарных соединений с сильно различающейся величиной ширины запрещенной зоны является тот факт, что начало коротковолнового спада локализовано вблизи одной и той же энергии падающих фотонов $\hbar\omega$ более 3.4 эВ. Это обстоятельство может быть связано с влиянием поглощения в тонких широкозонных слоях, для которых ширина запрещенной зоны близка для различных структур и превышает ширину запрещенной зоны веществ подложек. Рост ширины запрещенной зоны в слоях относительно исходных подложек с учетом особенностей развитого нами технологического процесса может быть следствием замещения атомов As или P в исходных соединениях на атомы азота.

Фотолуминесценция слоев

Типичные спектральные зависимости фотолуминесценции (ФЛ) слоев, образующихся в использованном технологическом процессе на поверхности монокристаллов GaAs и GaP, представлены на рисунке (кривые 3 и 4). Фотолуминесценция возбуждалась излучением импульсного азотного лазера ($\hbar\omega = 3.68\text{ эВ}$), длительность импульсов 2 нс, частота повторения 100 Гц. Спектральные зависимости ФЛ, приведенные на рисунке, измерялись в стробоскопическом режиме с временем задержки относительно возбуждающего импульса $\tau = 0\text{ с}$ при постоянной времени 100 нс.

Визуально ФЛ при 80 К в области локализации возбуждающего светового зонда на поверхности слоев, образовавшихся на GaAs и GaP, имеет вид окрашенной в голубой цвет зоны, в пределах которой в ряде образцов можно было различать точки, яркость которых превосходила яркость зоны свечения. Как видно из рисунка, для слоев на различных соединениях рекомбинационное излучение имеет вид широкой бесструктурной и несимметричной полосы, максимум которой центрирован в окрестности 3 эВ, что существенно выше ширины запрещенной зоны как GaAs, так и GaP и находится в качественном соответствии с представленными выше данными исследований фоточувствительности структур слой/подложка. Полная ширина полос ФЛ на полувысоте для слоев на GaAs $w_{1/2} = 630\text{ мэВ}$, причем длинноволновая ширина $w_l = 380\text{ мэВ}$ превышает коротковолновую $w_s = 250\text{ мэВ}$. В случае слоев на GaP $w_{1/2} = 550\text{ мэВ}$ ($w_l = 410\text{ мэВ}$, $w_s = 180\text{ мэВ}$) при $T = 80\text{ К}$. Для слоев на фосфиде галлия к тому же обнаружена дублетная структура максимума ФЛ (рисунок, кривая 4). Большие значения ширин полос ФЛ указывают на тот факт, что ответственные за наблюдаемое излучение полсопы имеют неэлементарную природу и их идентификация требует дальнейших исследований.

Главным итогом представленных результатов исследований ФЛ следует считать, что развитый технологический процесс вызывает увеличение ширины запрещенной зоны GaAs и GaP, что может быть результатом замещения As или P азотом.

Список литературы

- [1] S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa, S. Nagahama, T. Yamada, T. Mukai. Jpn. J. Appl. Phys., **30**, 1998 (1991).
- [2] Yoshida. J. Cryst. Growth., **136**, 37 (1994).
- [3] S.G. Konnikov, V.Yu. Rud', Yu.V. Rud', D. Melebaev, A. Berkeliev, M. Serginov, S. Televov. Jpn. J. Appl. Phys., **32S**, 515 (1993).

Редактор В.В. Чалдышев

Optoelectronic phenomena in GaAs and GaP layers obtained by nitrogen treatment

V.F. Agekyan*, V.I. Ivanov–Omskii, V.N. Knyazevskii,
V.Yu. Rud'†, Yu.V. Rud'

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia

*State University,
198904 St.Petersburg, Russia

†State Technical University,
195251 St.Petersburg, Russia