

К ВОПРОСУ О МАКСИМАЛЬНОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ВЫХОДЕ  
ИНЪЕКЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Ю.Н.Николаев

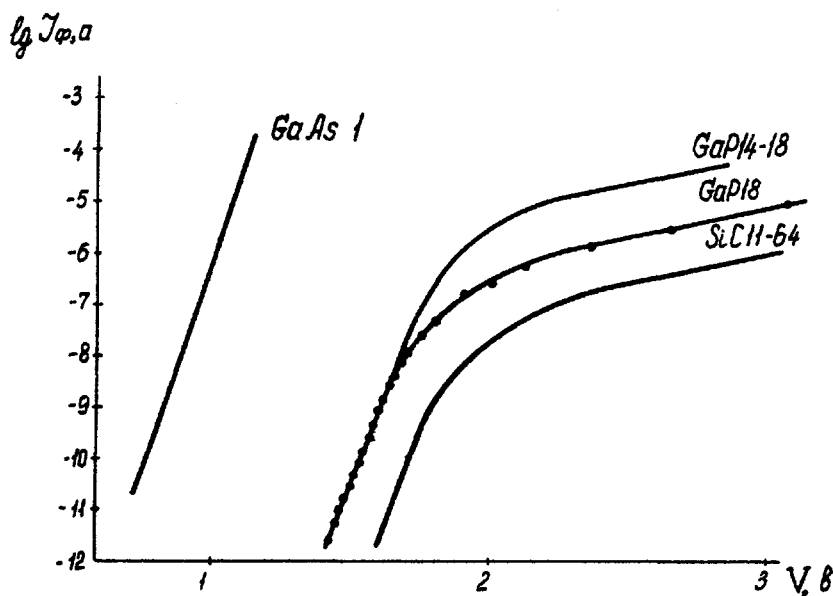
В работе М.В.Фока [1] в результате анализа различных механизмов электролюминесценции был сделан вывод о том, что инъекция неосновных носителей тока может обеспечить энергетический выход, превышающий во много раз значения, полученные на порошкообразных фосфорах. При знакомстве с этой работой может сложиться впечатление, что в практически полезных случаях энергетический выход инъекционных электролюминофоров не может быть близким к термодинамическому пределу вследствие джоулевых потерь в базовом материале прибора. Этот момент заслуживает более пристального изучения, так как вопрос об энергетическом выходе является ключевым в проблеме использования полупроводников для целей освещения [2].

Мы использовали инъекционную электролюминесценцию диффузионных  $p-n$  переходов в карбиде кремния, фосфиде и арсениде галлия. Образцы были изготовлены диффузией акцепторов в монокристаллы  $n$ -типа с концентрацией доноров около  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Кристаллы имели форму параллелепипеда с основанием  $1 \times 1$  мм высотой 0,3 мм. Плоскость перехо-

474

да параллельна основанию. На нижнюю и верхнюю грань нанесены металлические электроды, обеспечивающие невыпрямляющие низкоомные контакты. Рекомбинационное излучение выходило из боковых граней. Градиент концентрации акцепторов в области  $p-n$ -перехода, определенный по зависимости емкости переходов от напряжения, в среднем составлял  $4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-4}$ .

Были измерены спектры излучения, квантовый выход и зависимость интенсивности рекомбинационного излучения от напряжения в диапазоне температур от 78 до  $400^\circ\text{K}$ . Максимальная плотность тока, которая зависела от нагрева образцов, составляла  $1 \text{ а.см}^{-2}$ .



Зависимость интенсивности рекомбинационного излучения от напряжения, приложенного к  $p-n$ -переходу

На рисунке представлены типичные люмен-вольтные характеристики нескольких переходов, снятые при комнатной температуре. На одной из них точками нанесены экспериментальные результаты.

При слабых возбуждениях электролюминофоров интенсивность рекомбинационного излучения ( $B$ ) изменялась в зависимости от приложенного напряжения ( $U$ ) и температуры ( $T$ ) по закону:

$$B = B_0 |T| \exp eU/kT ,$$

где  $B_0(T)$  - коэффициент, зависящий от  $T$ , но не зависящий от  $U$ ;  $e$  - заряд электрона;  $k$  - постоянная Больцмана. Вид показателя экспоненты в этой формуле указывает на то, что электроны, участвующие в процессе излучательной рекомбинации, подчиняются статистике Больцмана и, следовательно, они преодолевают потенциальный барьер за счет тепловой энергии. При комнатной температуре численные значения величин энергий квантов (в электронвольтах) в максимумах спектров излучения превышали минимальные приложенные напряжения (в вольтах), при которых становилось заметным свечение для  $GaAs$  на 0,7 в, для  $GaP$  на 0,33 в, для  $SiC$  на 0,25 в. Следовательно, участвовавшие в излучательной рекомбинации носители тока от 10 до 50% излученной энергии черпали из запасенного решеткой тепла.

Если в центрах излучательной рекомбинации нет внутреннего гашения и они изолированы от центров гашения, то эти значения соответствуют предельному выигрышу в энергетическом выходе для данного электролюминофора. Полученные результаты близки к максимально допустимому с точки зрения термодинамики энергетическому выигрышу электролюминесценции [3].

В образцах из арсенида галлия джоулевы потери энергии были малы во всем исследованном диапазоне вплоть до токов, приведших к разогреву образцов. При сильных возбуждениях  $p-n$ -переходов из фосфида галлия и карбида кремния наблюдалось отклонение люмен-вольтной характеристики от экспоненты. Причина отклонения - джоулевы потери в высокоомном слое, образованном в районе диффузионного  $p-n$ -перехода вследствие компенсации примесей [4,5]. Эти потери можно существенно уменьшить, если сократить толщину слоя.

Расчет показывает, что сопротивление базового материала во всех исследованных нами  $p-n$ -переходах настолько незначительно, что джоулевы потери в нем существенно меньше потерь энергии, связанных с безызлучательной рекомбинацией. Последние приводят к разогреву образцов и этим ограничивают дальнейшее увеличение яркости электролюминесценции.

При комнатной температуре максимальный внешний квантовый выход исследованных нами образцов из арсенида галлия достигал 0,7%, из фосфида галлия - 0,02%, из карбида кремния - 0,1%. Внутренний квантовый выход был, по крайней мере, на порядок выше. Если в центрах свечения этих материалов нет внутреннего гашения, то, очистив полупроводники от гасителей люминесценции, можно изготовить источники света с энергетическим выходом, близким к термодинамическому пределу, так как джоулевы потери достаточно малы в широком диапазоне токов. Однако получение низкоомных люминофоров с квантовым выходом, близким к единице, представляет известные технологические трудности.

Автор благодарит М.В.Фока за всестороннее обсуждение проблемы, а также И.И.Круглова за ценные замечания.

Поступило в редакцию  
4 октября 1966 г.

#### Литература

- [1] М.В.Фок. Оптика и спектроскопия, 18, 1024, 1965.
- [2] A.G.Fischer, H.J.Moss. J.Appl. Phys., 34, 2112, 1963.
- [3] M.A.Weinstein, J.Opt. Soc. Amer., 50, 597, 1960.
- [4] Д.Н.Николаев. Тр.конф. по карбиду кремния, Гиредмет, 1965 (в печати).
- [5] В.И.Павличенко, И.В.Рыжиков, Т.Г.Кмита, П.М.Карагеоргий-Алкалаев, А.Д.Лейдерман. ФТТ, 8, 1239, 1966.