

РЕЗОНАНСНАЯ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ СТРУКТУРЫ
МЕТАЛЛ – ПОЛУПРОВОДНИК
С ГОФРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮЛ.В. Б е л я к о в, Д.Н. Г о р я ч ё в,
Б.Л. Р у м я н ц е в, О.М. С р е с е л и,
И.Д. Я р о ш е ц к и й

В последние годы появились работы по исследованию выпрямляющих структур металл-полупроводник (диод Шоттки) с периодически гофрированной поверхностью [1, 2]. Показано, что возбуждение поверхностных электромагнитных волн или поверхностных плазмон-поляритонов (ПП) на внешней границе металла вызывает резонансное возрастание фотоответа такой структуры при определенных длинах волн и углах падения возбуждающего ПП света. Представляло интерес выяснить, влияет ли периодически гофрированная поверхность структуры металлполупроводник на спектр и поляризацию ее электролюминесценции (ЭЛ) в связи с возможностью существования ПП в такой структуре.

В данной работе исследованы спектры ЭЛ диодов Шоттки с рельефной дифракционной решеткой, вытравленной на поверхности полупроводника фотохимическим методом перед нанесением металла. Использовались структуры $Au-n-GaP$, $n = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Из их вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик следует, что высота энергетического барьера φ_B составляет не менее 1.3 эВ, причем на границе раздела присутствует туннельно-тонкий слой диэлектрика – собственного окисла.

ЭЛ возбуждалась импульсами тока частотой 140 Гц, скважностью порядка 6 и амплитудой 50–150 мА при прямом смещении и 5–100 мА при обратном (площадь диодов составляла 0.02–0.1 см^2). Спектры ЭЛ измерялись при комнатной температуре со стороны выпрямляющего полупрозрачного слоя металла с помощью монохроматора МДР-2 с дифракционной решеткой 600 мм^{-1} и призмой Глана на выходной щели и охлаждаемого ФЭУ-62. Угловое разрешение составляло величину 3–5 градусов.

Обнаружено, что спектры ЭЛ диодов с дифракционной решеткой существенно отличаются от спектров диодов с гладкой поверхностью (рис. 1, 2). На них появляется дополнительный максимум как при прямом, так и при обратном смещении, причем излучение в этом максимуме линейно поляризовано так, что вектор магнитного поля параллелен штрихам решетки. При наблюдении ЭЛ под углом θ к поверхности образца в плоскости, перпендикулярной штрихам решетки, на спектральных зависимостях вместо одного дополнительного пика регистрируются два пика, которые раздвигаются с увеличением угла.

Поляризация излучения и угловая зависимость энергетического положения пиков свидетельствуют о связи этого резонансного излу-

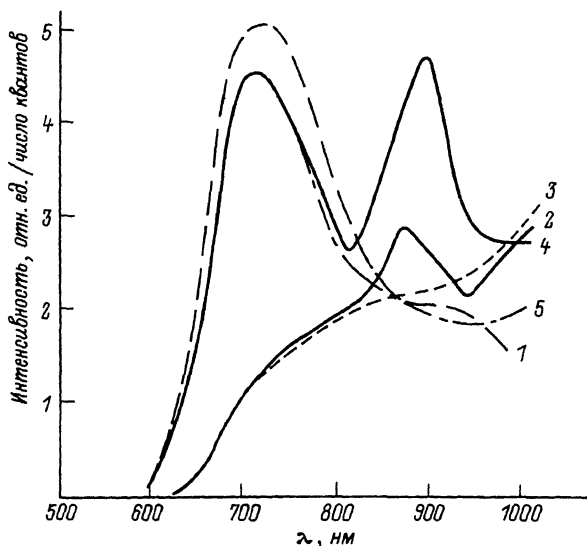


Рис. 1. Спектры ЭЛ структуры $Au-n-GaP$ при прямом смещении. 1 - гладкая поверхность, $U = 2.8$ В, $J = 3$ А/см²; 2-5 - структуры с дифракционной решеткой на поверхности; 2, 3 - шаг решетки $a = 0.85$ мкм, глубина $h = 400$ Å, $U = 3.3$ В, $J = 0.69$ А/см²; 4, 5 - $a = 0.86$ мкм, $h = 850$ Å, $U = -2.7$ В, $J = 2.32$ А/см²; 2, 4 - вектор \vec{H} регистрируемого света параллелен штрихам решетки; 3, 5 - \vec{H} перпендикулярен штрихам решетки.

лучения с ПП. Расчет дисперсионных кривых показал, что пики соответствуют переизлучению ПП, распространяющихся по границе воздух-металл, в объемную световую волну посредством дифракционной решетки. При этом должно выполняться условие сохранения волнового вектора при возбуждении или при переизлучении ПП на решетке:

$$K_{nn} = mG + 2\pi/\lambda \cdot \sin \theta,$$

где K_{nn} - волновой вектор ПП, $G = 2\pi/a$ - волновой вектор дифракционной решетки с периодом a , $m = \pm 1, \pm 2 \dots$

При наблюдении ЭЛ по нормали к поверхности образца ($\theta = 0$) дополнительный пик соответствует переизлучению ПП с волновым вектором $K_{nn} = G$, т.е. $\lambda_{рез} \cong a$ (с погрешностью порядка 2-5%). При наблюдении под фиксированным углом θ регистрируется переизлучение двух ПП с волновыми векторами $K_{nn} = G + 2\pi/\lambda_1 \cdot \sin \theta$ и $K_{nn} = G - 2\pi/\lambda_2 \cdot \sin \theta$. Экспериментально полученные значения K_{nn} практически совпадают с рассчитанными для гладкой поверхности Au - воздух, небольшое отклонение в сторону больших K_{nn} вызвано неучтенным влиянием гофрировки поверхности и конечной толщины слоя золота.

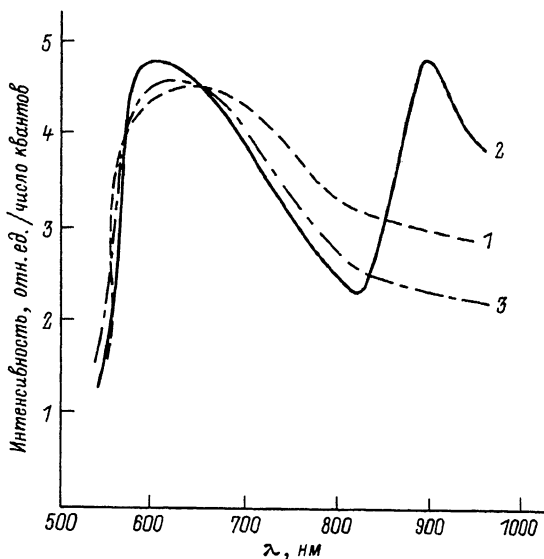


Рис. 2. Спектры ЭЛ структуры *Au-n-GaP* при обратном смещении. 1 - гладкая поверхность, $U = 10.3$ В, $J = 1.3$ А/см²; 2, 3 - структура с дифракционной решеткой, $a = 0.86$ мкм, $h = 850$ Å, $U = 10.2$ В, $J = 1.24$ А/см²; 2 - \vec{H} параллелен штрихам решетки; 3 - \vec{H} перпендикулярен штрихам решетки.

Возбуждение ПП при протекании тока, сопровождающегося излучением, может происходить двумя путями.

1. При прямых смещениях в структурах с туннельно-тонким диэлектриком существенна ЭЛ, связанная с инжекцией электронов в металл. Она особенно ярко проявляется в широкозонных полупроводниках с большими изгибами зон на поверхности [3]. Электрон, переходящий из зоны проводимости полупроводника в металл, является „горячим“, т.к. обладает энергией, превышающей уровень Ферми в металле на величину не менее высоты барьера Шоттки $e\varphi_B$, и теряет эту энергию не только безызлучательным путем, но и излучая свет с энергией квантов, меньшей $e\varphi_B$. Интенсивность такой ЭЛ растет с уменьшением энергии квантов. На *GaP* эта ЭЛ отчетливо видна при малых плотностях тока при сравнительно толстых оксидных слоях (кривые 2 и 3 на рис. 1). Возбуждение ПП в этом случае возможно благодаря высокочастотным флуктуациям тока горячих электронов в металле с последующим переизлучением в объемную световую волну на поверхностных шероховатостях [4]. ЭЛ при прямых смещениях наблюдалась при приложении напряжений $U = 2.5-3.5$ В в зависимости от толщины оксидного слоя, поэтому условие возбуждения ПП с энергией $\hbar\omega \leq eU$ всегда выполнялось.

2. При приложении к структуре больших обратных напряжений наблюдается предпробойная ЭЛ в ОПЗ полупроводника (рис. 2). Известно, что в случае плоской границы полупроводника наружу выводится незначительный процент возникающего излучения ($\sim 1\%$ для GaP), остальная его часть вследствие полного внутреннего отражения (ПВО) остается в кристалле. Но при наличии на поверхности полупроводника полупрозрачного слоя металла, а также дифракционной решетки, возникает дополнительный канал вывода излучения путем возбуждения ПП аналогично методу нарушенного ПВО в геометрии Кречмана. При оптимальном подборе параметров слоя металла и дифракционной решетки такой резонансный вывод ЭЛ может быть достаточно эффективным.

Этот механизм может существовать также и при прямом смещении при достаточно больших токах, когда наблюдается ЭЛ при рекомбинации инжектированных в ОПЗ дырок (кривые 4 и 5 на рис. 1).

На основании описанных представлений можно также предположить, что искусственно созданная нерегулярная шероховатость поверхности повысит выход ЭЛ излучательных структур металл-полупроводник неселективно, т.е. в широком диапазоне длин и углов.

В заключение надо отметить, что обнаруженная резонансная линейно-поляризованная ЭЛ структур металл-полупроводник с гофрированной поверхностью открывает новые возможности использования диодов Шоттки.

Л и т е р а т у р а

- [1] Беляков Л.В., Горячев Д.Н., Сресели О.М., Ярощцкий И.Д. - Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, № 19, с. 1162-1165.
- [2] Berthold K., Beinstingl W., Berger R., Gornik E. - Appl. Phys. Lett., 1986, v. 48, N 8, p. 526-528.
- [3] Косяченко Л.А., Кухто Е.Ф., Склярчук В.М. - ЖТФ, 1984, т. 54, № 6, с. 1185-1186.
- [4] Kirtley J.R., Theis T.N., Tsang J.C. - Appl. Phys. Lett., 1980, v. 37, N 5, p. 435-437.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
11 февраля 1988 г.