

В случае сильно неоднородной пленки ( $L/a \gg 1$ ) и  $\varepsilon_+ \neq \varepsilon_-$  имеет место взаимодействие мод. При  $\omega < \omega_p$  и  $\delta = |\varepsilon_+ - \varepsilon_-|/2 \ll 1$  выражение для частот взаимодействующих волн имеет вид

$$\omega = \omega_{\text{рез}} \pm 12\delta\varepsilon_0 \omega_p (a/L)^3, \quad (10)$$

где  $\varepsilon_0 = (\varepsilon_+ + \varepsilon_-)/2$ , а  $\omega_{\text{рез}}$  — частота колебаний, вырожденных при  $\delta = 0$ ,

$$\omega_{\text{рез}} = \omega_p [1 - 72\varepsilon_0^4 (L/a)^{-6}]. \quad (11)$$

Сравнивая (10) и (11), а также учитывая, что (10) получено для  $\omega < \omega_p$ , имеем ограничение

$$\delta < (L/a)^{-3}.$$

В области  $\omega > \omega_p$  вещественная часть  $I_1$  становится малой по сравнению с  $I_2$ , и ею можно пренебречь. Уравнение (6) тогда переписывается в виде

$$k \frac{\omega_p^2 L^3}{12a^2 \omega^2} = \varepsilon_+ + \varepsilon_- + i \frac{\pi k a \omega^2 (\varepsilon_+ - \varepsilon_-)^2}{4 \omega_p (\omega^2 - \omega_p^2)^{1/2}}. \quad (12)$$

Если  $kL^3/a^2 \gg 1$ , то (12) имеет слабо затухающее решение типа (9)

$$\omega^2 \approx \frac{kL^3 \omega_p^2}{12a^2 (\varepsilon_+ + \varepsilon_-)} \left[ 1 - i \frac{\pi}{8\sqrt{3}} (kL)^{3/2} \frac{(\varepsilon_+ - \varepsilon_-)^2}{(\varepsilon_+ + \varepsilon_-)^{3/2}} \right]. \quad (13)$$

Решение (13) показывает, что в случае сильной неоднородности и несимметричных обкладок ветвь спектра с законом дисперсии  $\omega \sim (kL)^{1/2}$  становится затухающей в области  $\omega > \omega_p$  за счет взаимодействия с ветвью, определяемой другим решением дисперсионного уравнения. Случай бесстолкновительного затухания решения типа (8) для переходного слоя металл—диэлектрик [1] также может быть получен при анализе уравнения (6) с соответствующим выбором  $\varepsilon(x)$ .

При  $kL^3/a^2 \gg 1$  и  $\omega < \omega_p$  решение уравнения (6) имеет вид

$$\omega^2 \approx \omega_p^2 \left[ 1 - \frac{1}{16} \pi^2 k^2 a^2 (\varepsilon_+ + \varepsilon_-)^2 \right].$$

#### Список литературы

- [1] Бланк А. Я., Березинский В. Л. // ЖЭТФ. 1978. Т. 75. В. 6. С. 2317—2329.  
 [2] Зырянова Н. П., Окулов В. И. // ФММ. 1988. Т. 66. В. 3. С. 614—616.  
 [3] Straight S. R., Mills D. L. // Phys. Rev. B. 1988. V. 38. N 12. P. 8526—8528.

Ленинградский государственный университет

Получено 24.04.1989  
 Принято к печати 15.05.1989

ФТП, том 23, вып. 9, 1989

## ПАССИВАЦИЯ ДОНОРОВ И АКЦЕПТОРОВ В ТРОЙНЫХ И ЧЕТВЕРНЫХ РАСТВОРАХ СИСТЕМЫ InGaAsP С ПОМОЩЬЮ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА

Омельяновский Э. М., Пахомов А. В., Поляков А. Я.,  
 Шепекина Г. В.

Пассивация примесей и дефектов с помощью атомарного водорода уже достаточно хорошо изучена для целого ряда полупроводниковых материалов (см., например, обзор [1]). В самое последнее время это явление наблюдалось в фосфиде индия, где с помощью водородной пассивации можно делать электри-

№ образца	Состав	Обработка	Тип проводимости	Подвижность, см <sup>2</sup> В·с	Концентрация электронов, дырок, см <sup>-3</sup>	
Н-323	In <sub>0.52</sub> Ga <sub>0.47</sub> As	}	<i>И*</i>	<i>n</i>	9630**	6.4·10 <sup>15</sup>
			<i>В</i>	<i>n</i>	10000	5.4·10 <sup>15</sup>
Н-320	То же	}	<i>И</i>	<i>n</i>	5400	5.6·10 <sup>16</sup>
			<i>В</i>	<i>n</i>	6020	3.8·10 <sup>16</sup>
Н-315	» »	}	<i>И</i>	<i>n</i>	5660	1.35·10 <sup>17</sup>
			<i>В</i>	<i>n</i>	6500	1.15·10 <sup>17</sup>
Н-326	» »	}	<i>И</i>	<i>p</i>	100	5.0·10 <sup>14</sup>
			<i>В</i>	<i>n</i>	8300	1.6·10 <sup>14</sup>
			<i>02</i>	<i>p</i>	82	3.7·10 <sup>14</sup>
Н-322	» »	}	<i>И</i>	<i>p</i>	135	9.0·10 <sup>14</sup>
			<i>В</i>	<i>n</i>	6200	2.7·10 <sup>14</sup>
			<i>01</i>	<i>p</i>	720	5.9·10 <sup>14</sup>
В-103	» »	}	<i>И</i>	<i>p</i>	159	7.8·10 <sup>14</sup>
			<i>02</i>	<i>p</i>	165	9.6·10 <sup>14</sup>
Г-547	In <sub>0.73</sub> Ga <sub>0.27</sub> As <sub>0.63</sub> P <sub>0.37</sub>	}	<i>И</i>	<i>p</i>	79	7.9·10 <sup>16</sup>
			<i>В</i>	<i>n</i>	1700	3.8·10 <sup>16</sup>

Примечание. \* *И* — исходные данные, *В* — после гидрогенизации, *01* и *02* — после отжига в атмосфере H<sub>2</sub> в течение 30 мин при 350 и 400 °С соответственно, данные по каждому образцу приведены в последовательности проводившихся обработок. \*\* Электрические измерения проводились при T = 300 К.

чески не активными мелкие акцепторы [2, 3] и мелкие доноры [3, 4]. Для практического использования эффекта было бы важно установить, что происходит при водородной обработке с мелкими центрами в тройных твердых растворах InGaAs и четверных растворах InGaAsP. Это и было целью настоящей работы.

Твердые растворы получались методом жидкофазной эпитаксии на полупроводящих подложках InP(Fe). Толщина пленок составляла 2—6 мкм. Для контроля состава твердых растворов использовался метод фотолюминесценции. Доноры и акцепторы в тройных твердых растворах представляли собой неконтролируемый примесный фон. Для его снижения в ряде случаев в расплав добавлялся гадолиний [5]. Четверные растворы InGaAsP были легированы марганцем.

Электрические параметры пленок определялись стандартным методом Ван-дер-Пау. Обработка в атомарном водороде проводилась в устройстве, исключавшем ионную бомбардировку поверхности образцов [3], при температурах ~400 °С в течение 15 мин. Чтобы убедиться в том, что эффект пассивации не является следствием тривиального отжига, часть образцов была обработана при тех же температурах в атмосфере молекулярного водорода. Для исследования термической стабильности эффекта пассивации гидрогенизированные образцы также отжигались в атмосфере H<sub>2</sub>.

Результаты проведенных обработок представлены в таблице. В образцах *p*-типа после обработки происходила конверсия типа проводимости. Слои имели невысокую концентрацию доноров, по нашим оценкам, близкую к донорному фону до обработки, и обладали достаточно высокой подвижностью электронов. В пленках *n*-типа несколько уменьшилась концентрация электронов и также возросла подвижность. В обоих случаях температурные зависимости концентраций электронов обработанных слоев не проявили присутствия каких-либо дополнительных, более глубоких центров. Совокупность этих данных указывает скорее на образование исходно активными центрами нейтральных комплексов с водородом, чем на возникновение компенсирующих уровней. Термическая стабильность комплексов акцепторов с водородом в слоях InGaAs оказалась несколько ниже, чем в InP [3]. Как видно из таблицы, отжиг в атмосфере H<sub>2</sub> при 350 °С приводит к частичному восстановлению электрической активности акцепторов.

Факт  $p$ - $n$ -конверсии можно было бы объяснить тем, что водород в исследуемых твердых растворах является глубоким донором. В материале  $p$ -типа он в таком случае легко вступает во взаимодействие с акцепторами, но не с донорами (из-за кулоновского отталкивания). Если в пассивации доноров в  $n$ -InGaAs (InGaAsP) участвует нейтральный или отрицательно заряженный водород, то донорный уровень водорода должен лежать заметно выше середины запрещенной зоны (иначе пассивировались бы и фоновые доноры в образцах, претерпевших  $p$ - $n$ -конверсию). Однако точное его положение можно будет установить после измерений пассивации доноров в более высокоомных образцах  $n$ -типа. Отметим, что описанная ситуация похожа на исследовавшиеся ранее эффекты пассивации в Si [6] и InP [2-4].

В заключение авторы благодарят Л. М. Долгинова и Е. В. Соловьеву за полезное обсуждение результатов.

#### Список литературы

- [1] Омеляновский Э. М., Поляков А. Я. // Высокочистые вещества. 1988. № 5. С. 5—19.
- [2] Chevallier J., Jalil A., Theys B., Pesant J. C., Aucouturier M., Rose B., Kazmierski C., Mircea A. // Mater. Sci. Forum. Def. in Semicond. 15 / Ed. by G. Ferenzi. Trans. Tech. Publ. Switzerland, Germany, UK, USA, 1989. P. 991—996.
- [3] Omeljanovsky E. M., Pakhomov A. V., Polyakov A. Y. // Mater. Sci. Forum. Def. in Semicond. 15 / Ed. by G. Ferenzi. Trans. Tech. Publ. Switzerland, Germany, UK, USA, 1989. P. 1063—1065.
- [4] Омеляновский Э. М., Пахомов А. В., Поляков А. Я. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 10. С. 1892—1894.
- [5] Алфёров Ж. И., Гореленок А. Т., Данильченко В. Г., Каманин А. В., Корольков В. И., Мамутин В. В., Габаров Г. С., Шмидт Н. М. // Письма ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 24. С. 1516—1519.
- [6] Pantelides S. T. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 50. N 5. P. 995—998.

Государственный научно-исследовательский  
и проектный институт редкометаллической  
промышленности  
Москва

Получено 11.05.1989  
Принято к печати 18.05.1989

ФТП, том 23, вып. 9, 1989

## ВОЗМОЖНЫЕ КВАНТОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОДНОМЕРНОГО БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

Бьюрков В. В., Федирко В. А.

Экспериментально наблюдалось явление ступенчатого изменения проводимости узкого канала в гетероструктуре на основе GaAs—AlGaAs при увеличении напряжения на затворе [1, 2]. Физика этого явления обсуждалась в указанных работах, а также в [3, 4]. Наблюдаемая зависимость связывалась с изменением условий квантования в канале вследствие уменьшения его сечения с ростом затворного напряжения.

В работах [1, 2] зависимость тока в канале от его ширины, определяемой напряжением на затворе, вычислялась в предположении, что падение напряжения на границах канала  $V \ll \epsilon_F/e$ , где  $\epsilon_F$  — энергия Ферми. В действительности в эксперименте осуществлялось еще более жесткое условие  $V < kT/e$ , где  $T$  — температура структуры. Проведем расчет зависимости баллистического тока через канал, устраняя указанные выше ограничения, и покажем, что аналогичные особенности могут проявляться и на зависимости дифференциального сопротивления канала от величины напряжения между истоком и стоком (см. рисунок).