

В. М. БОНДАР, В. В. ВЛАДИМИРОВ, Н. И. КОНОНЕНКО,
А. И. ЩЕДРИН

ВЛИЯНИЕ РАЗОГРЕВА ЭЛЕКТРОНОВ НА ВИНТОВУЮ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В МНОГОДОЛИННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

(Представлено академиком Б. Б. Кадомцевым 26 II 1975)

1. В настоящей работе исследуется вопрос о влиянии зонной структуры полупроводников на эффект винтовой неустойчивости * в электронно-дырочной плазме, возникающей в достаточно сильных электрическом E и параллельном ему магнитном H полях. В работах ⁽¹⁾ обнаружено сильное влияние междолинного перераспределения электронов, вызванного одноосным сжатием и растяжением кристаллов, на порог возбуждения осциллятора в кремнии и германии. Наблюдавшееся повышение порога ⁽¹⁾ обусловлено возникновением амбиполярного сноса винтовых возмущений в квазинейтральной плазме ($n=p$) при междолинном перераспределении, когда сильно проявляется анизотропия подвижности электронов.

Следует отметить, что в указанных полупроводниках неравномерное заселение электронных долин может возникать и в отсутствие деформации, если электрическое поле велико. В этом случае междолинное перераспределение обусловлено неравномерным разогревом электронов в долинах, вытянутых вдоль и поперек электрического поля (при этом суммарная концентрация остается постоянной). В условиях, когда перераспределение обусловлено греющим электрическим полем, амбиполярная подвижность b_a , определяющая скорость сноса винтовых возмущений, становится функцией электрического поля и поэтому следует ожидать, что пороговые характеристики осциллятора будут существенно иные (в слабых полях все долины эквивалентны и $b_a=0$ в квазинейтральной плазме).

Теоретическому и экспериментальному исследованию явления осциллятора в греющих электрических полях и посвящена настоящая работа. Все расчеты выполнены для кремния Si.

Напомним, что изоэнергетические поверхности Si вблизи дна зоны проводимости описываются шестью эллипсоидами вращения, расположенными попарно на трех взаимно перпендикулярных осях (типа $\langle 100 \rangle$). Отношение подвижностей, соответствующих длинной и короткой осям отдельного эллипсоида, в Si, $b_{||}/b_{\perp} \approx 1/5$. При температуре жидкого азота $T=77^\circ \text{K}$ междолинное перераспределение возникает в Si при поле $E \gtrsim 100$ в/см, ориентированном вдоль одной из указанных осей ⁽⁵⁾. При дальнейшем увеличении поля перераспределение весьма значительно.

На рис. 1 приведена соответствующая экспериментальная зависимость ⁽³⁾, которая понадобится нам при дальнейших расчетах. Так, при $E \approx 300$ в/см концентрация электронов в долинах, вытянутых вдоль поля n_1 , увеличивается вдвое; в области $E > 300$ в/см перераспределение медленно уменьшается с полем ввиду обратного переселения **. При ориентации электрического поля в направлении $\langle 111 \rangle$ междолинного перераспределения не возникает.

* Этот эффект впервые наблюдался Ю. Л. Ивановым и С. М. Рывкиным ⁽¹⁾ и был объяснен М. Гликсманом ⁽²⁾ в рамках теории винтовой неустойчивости Б. Б. Кадомцева — А. В. Недоспасова ⁽³⁾.

** При этом дифференциальная проводимость остается положительной.

2. Как и в работах ⁽⁴⁾, теоретический анализ проведен нами для случая поверхностной винтовой волны и слабых магнитных полей ($\frac{b_{\perp}}{c} H < 1$, это условие выполнялось в опытах) в рамках двухдолинной модели. Предполагалось, что в первом ансамбле, соответствующем двум долинам, вытянутым вдоль поля, подвижности электронов $b_{\parallel}$ и $b_{\perp}$ соответственно вдоль

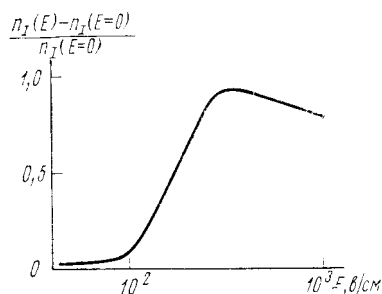


Рис. 1

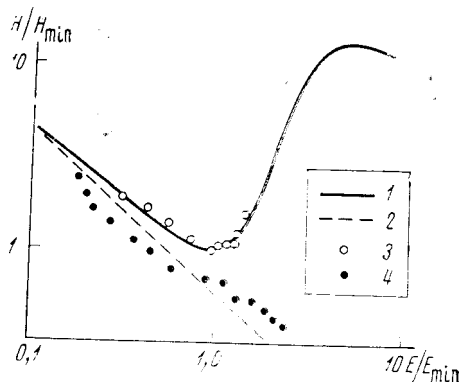


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость величины междолинного перераспределения в кремнии ⁽⁵⁾ от электрического поля, приложенного в направлении $\langle 100 \rangle$. $T = 77^\circ \text{ K}$

Рис. 2. Зависимость магнитного поля от электрического на пороге возбуждения осциллятора. 1, 2 — результаты расчета ($n=p$), 3, 4 — эксперимент; 1, 3 — $E \parallel \langle 100 \rangle$, 4 — $E \parallel \langle 111 \rangle$; 2 — разогрев электронов не учитывался. $E_{\min} \approx 100 \text{ В/см}$, $H_{\min} \approx 2 \text{ кэ}$

и поперек поля, а во втором ансамбле, объединяющем остальные долины, — $b_{\parallel \text{эф}}$ и $b_{\perp \text{эф}}$. Можно показать, что в случае кремния

$$b_{\parallel \text{эф}} = b_{\perp}, \quad b_{\perp \text{эф}} = (b_{\perp} + b_{\parallel})/2.$$

При расчетах не учитывалась деформация эллипсоидов подвижности в сильном электрическом поле (в Si значительное изменение $b_{\parallel}$ и $b_{\perp}$ происходит при $E \geq 1000 \text{ В/см}$ ⁽⁵⁾). Подвижность дырок b_h считалась изотропной. Отношение концентраций электронов в ансамблях в отсутствие разогрева $n_I/n_{II} = 1/3$. Схема вычислений аналогична применявшейся в работах ⁽⁴⁾, и поэтому мы приведем лишь окончательные результаты.

Критерий абсолютной неустойчивости винтовых волн, соответствующий порогу возбуждения осциллятора в условиях амбиполярного сноса возмущений в продольном электрическом поле, определяли по методу Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица ⁽⁶⁾. Этот критерий имеет вид

$$(\tilde{\mathbf{E}} \cdot \tilde{\mathbf{H}})^2 > \left[\frac{3a_1 \tilde{n}(1+a_1)}{(a_1+a_3)(a_2+a_1 \tilde{n})} \right]^2 \left[\tilde{b}_a^2 \tilde{\mathbf{E}}^2 + \frac{32}{3} \left(1 + \frac{1}{\tilde{n}} \right)^2 \frac{a_1(a_1+a_3)}{(1+a_1)^2} + \right. \\ \left. + \frac{32}{3} \left(1 + \frac{1}{\tilde{n}} \right) \frac{a_1}{(1+a_1)^2} \tilde{\mathbf{E}} \left(\tilde{b}_{\parallel} \frac{dn_I}{d\tilde{\mathbf{E}}} + \tilde{b}_{\parallel \text{эф}} \frac{d\tilde{n}_{\parallel}}{d\tilde{\mathbf{E}}} \right) \right], \quad (1)$$

где

$$\tilde{b}_a = \frac{b_a}{b_h} = \frac{\tilde{n}a_1 - a_2}{\tilde{n}(1+a_1)}, \quad \tilde{\mathbf{E}} = \frac{Rb_h \mathbf{E}}{D_a}, \quad \tilde{\mathbf{H}} = \frac{b_h \mathbf{H}}{c}, \quad \tilde{n} = \frac{n}{p},$$

R — радиус образца,

$$a_1 = \tilde{n}_I \tilde{b}_{\perp} + \tilde{n}_{II} \tilde{b}_{\perp \text{эф}}, \quad a_2 = \tilde{n}_I \tilde{b}_{\parallel} + \tilde{n}_{II} \tilde{b}_{\parallel \text{эф}}, \\ a_3 = \tilde{n}_I \tilde{b}_{\perp}^2 + \tilde{n}_{II} \tilde{b}_{\perp \text{эф}}^2, \quad \tilde{b}_{\perp, \parallel} = \frac{b_{\perp, \parallel}}{b_h}.$$

В случае квазинейтральной плазмы ($\tilde{n}=1$) и слабых электрических полей, не вызывающих перераспределения

$$\tilde{v}_a=0, \quad \frac{d\tilde{n}_{i,II}}{d\tilde{E}}=0$$

и на пороге возбуждения осциллятора магнитное поле уменьшается при увеличении электрического ($H_n \sim 1/E$) в соответствии с хорошо известными результатами (^{2, 7}). В условиях разогрева, когда $\tilde{v}_a \neq 0$, зависимость порогового магнитного поля от электрического существенно иная (рис. 2, 1). Начиная с полей $E \approx 100$ в/см, когда в кремнии возникает междудоллинное перераспределение ($T=77^\circ \text{ K}$), пороговое магнитное поле резко возрастает при увеличении электрического, что обусловлено появлением амбиполярного сноса возмущений, усиливающегося по мере увеличения перераспределения. Таким образом, на пороговой зависимости $H(E)$ должен возникнуть минимум, если электрическое поле параллельно оси $\langle 100 \rangle$. При $E \gtrsim 300$ в/см перераспределение ослабляется (рис. 1) и аномальный участок на пороговой кривой $H(E)$ сглаживается. Для сравнения на рис. 2, 2 приведена пороговая зависимость $H(E)$ в отсутствие разогрева электронов.

Опыты проводились на образцах p -Si при температуре жидкого азота (электронно-дырочная плазма создавалась с помощью инжектирующих контактов). Принципиальная схема измерений и параметры образцов аналогичны использованным в работах (⁴). Результаты измерений зависимости $H(E)$ на пороге возбуждения осциллятора приведены на рис. 2, 3, 4 для случаев, когда электрическое поле ориентировано в направлениях $\langle 100 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$. Как видно из этого рисунка, результаты расчетов хорошо согласуются с данными опытов, если не считать небольшого различия абсолютных значений $H_{\min}$, $E_{\min}$, найденных в экспериментах и путем вычислений.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности исследования характера междудоллинного перераспределения в полупроводниках в сильных электрических полях путем изучения основных характеристик осциллятора. До настоящего времени все эксперименты по исследованию осциллятора проводились в области слабых электрических полей.

В заключение выражаем глубокую благодарность О. Г. Сарбею, обратившему наше внимание на рассмотренные в статье вопросы.

Институт физики
Академии наук СССР
Киев

Поступило
25 II 1975

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Ю. Л. Иванов, С. М. Рыбкин, ЖТФ, т. 28, 774 (1958). ² M. Glicksman, Phys. Rev., v. 124, 1655 (1961). ³ В. В. Kadomtsev, A. V. Nedospasov, J. Nucl. Energy, Part C, v. 230 (1960). ⁴ В. М. Бондар, В. В. Владимиров и др., ЖЭТФ, т. 65, 1093 (1973); В. М. Бондар, В. В. Владимиров и др., ФТТ, т. 17, в. 2 (1975). ⁵ О. Г. Сарбей, Докт. дисс., Киев. 1971; M. Asche, B. L. Voichenko et al., Phys. Stat. Sol., v. 44, 173 (1971). ⁶ Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Механика сплошных сред. М., Физматгиз, 1951. ⁷ С. Е. Hurwitz, A. L. McWhorter, Phys. Rev., v. 134A, 1033 (1964).