

ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ НИЖНЕГИБРИДНОГО НАГРЕВА ИОНОВ В ТОКАМАКЕ ФТ-2

В. Н. Будников, Л. А. Есипов, М. А. Ирмак

В экспериментах по нижегибридному (НГ) нагреву ионов на токамаке ФТ-2 было установлено, что генерация быстрых ионов и нагрев ионной компоненты не связаны с областью линейной трансформации. Так, для греющей волны на частоте $f_0=920$ МГц при магнитном поле $B=20$ кГс линейная трансформация возбужденной в плазме косой ленгмюровской волны (КЛВ) в теплую плазменную моду должна происходить при концентрации $n_{LH}=4 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$ (с учетом $Z_{eff}=2$) [1]. Однако генерация быстрых ионов начинается с концентрации $n^* \approx (0.3-0.5) n_{LH}$, зависящей от ВЧ мощности $P_{ВЧ}$ и тока плазмы I_p , а именно n^* падает с ростом $P_{ВЧ}$ и уменьшением I_p . Вблизи граничной концентрации n^* спектр генерируемых ионов, определяемый по спектрам нейтралей перезарядки, зависит от концентрации плазмы n_e и

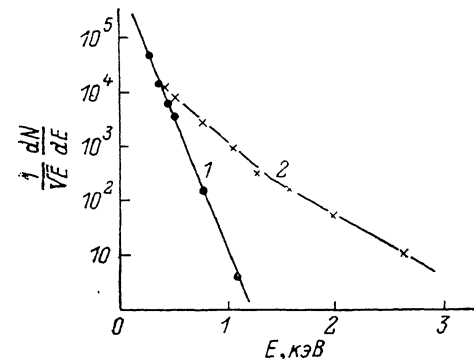


Рис. 1. Спектр нейтралей перезарядки.

1 - $T_i^{0H} = 80$ эВ, 2 - $T_i^{BЧ} = 240$ эВ, $T_h = 350$ эВ.

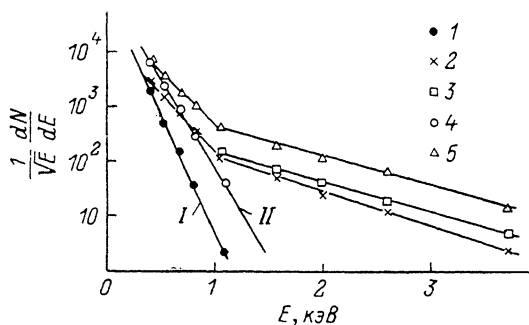


Рис. 2. Спектры нейтралей перезарядки.

Случай I: 1 - $T_i^{0H} = 100$ эВ; 2 - $T_i^{BЧ} = 190$ эВ, $P_{ВЧ} = 50$ кВт, $n_e = 1.5 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$; 3 - $P_{ВЧ} = 100$ кВт.

Случай II: 4 - $T_i^{0H} = 130$ эВ, 5 - $T_i^{BЧ} = 190$ эВ, $P_{ВЧ} = 120$ кВт, $n_e = 2.3 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$.

мощности $P_{ВЧ}$: с ростом n_e и $P_{ВЧ}$ генерируются все более энергичные ионы, причем генерация начинается в центральной области плазмы. Иными словами, при заданной мощности нагрева существует «коридор» по концентрации, в котором надтепловые ионы умеренных энергий генерируются в центре шнура, а очень быстрые ионы в спектре отсутствуют. Такая ситуация является, очевидно, оптимальной для нагрева ионов.

Следует отметить, что факт генерации быстрых ионов при НГ нагреве при концентрациях, вдвое меньших, чем n_{LH} , причем в центральной области токамака, отмечался на токамаках Alcator A [2] и ASDEX [3].

При практическом осуществлении НГ нагрева надо учитывать, что при вводе ВЧ мощности происходит рост концентрации плазмы. Увеличение концентрации, как можно думать, приводит к перемещению области поглощения волны и генерации ионов на периферию шнура, что ухудшает эффективность нагрева (перемещение области генерации быстрых ионов на периферию с ростом n_e отмечено в [3]). Прирост концентрации увеличивается с ростом ВЧ мощности, а локальная концентрация n^* , при которой начинается генерация ионов, как отмечалось выше, уменьшается с ростом ВЧ мощности. Оба эти факта очень сильно сказываются на перемещении области генерации ионов на периферию и приводят к падению эффективности нагрева с ростом мощности. Такой эффект был отмечен в докладе [4]. В данной работе мы приведем ряд примеров НГ нагрева ионов в различных экспериментальных условиях, иллюстрирующих приведенные выше соображения.

На рис. 1 представлен спектр нейтралей перезарядки, полученный анализатором атомных частиц, для эксперимента, выполненного при магнитном поле 12 кГс, концентрации

плазмы $\bar{n}_e = 1.3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, токе плазмы $I_p = 20 \text{ кА}$, ВЧ мощности $P_{\text{ВЧ}} = 50 \text{ кВт}$. Этот случай интересен тем, что при таком малом магнитном поле условия линейной трансформации для волны на частоте $f_0 = 920 \text{ МГц}$ отсутствуют при любой концентрации n_e . Следует обратить внимание на довольно большой прирост температуры ионов T_i от 80 до 240 эВ ($\Delta T_i = 160 \text{ эВ}$), а также низкую температуру $T_h = 350 \text{ эВ}$ надтепловых ионов (так называемого «хвоста» функции распределения).

На рис. 2 приведены данные трех экспериментов при магнитном поле $B = 22 \text{ кГс}$ и токе плазмы $I_p = 30 \text{ кА}$. При плотности $\bar{n}_e = 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и мощности $P_{\text{ВЧ}} = 50 \text{ кВт}$ удается получить нагрев ионов от 100 до 190 эВ, т. е. $\Delta T_i = 90 \text{ эВ}$ (случай I). Повышение мощности в этом режиме до 100 кВт не приводит к дальнейшему приросту T_i , а только увеличивает число надтепловых ионов. Эффективность нагрева падает в 2 раза. Увеличение исходной концентрации до $\bar{n}_e = 2.3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и мощности до $P_{\text{ВЧ}} = 120 \text{ кВт}$ еще больше снижает эффективность нагрева (случай II). Видно, что в этом случае выше исходная температура ионов, а ΔT_i составляет всего 60 эВ. В то же время наблюдается увеличение числа регистрируемых нейтралей.

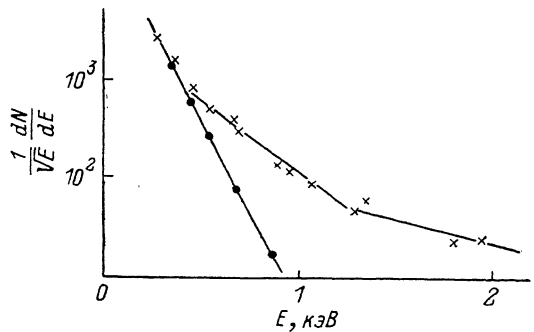


Рис. 3. Спектр нейтралей перезарядки.

$B = 26 \text{ кГс}$, $I_p = 35 \text{ кА}$, $P_{\text{ВЧ}} = 120 \text{ кВт}$, $\bar{n}_e = 1.4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

перезарядки из «хвоста» функции распределения. При больших уровнях ВЧ мощности оказывается сложно поддерживать условия оптимального нагрева из-за заметного прироста концентрации. Если же исходную концентрацию предварительно уменьшить ниже n^* , то генерации ионов определенной энергии на начальной стадии ВЧ импульса не будет до тех пор, пока концентрация не достигнет n^* . Это будет эквивалентно уменьшению времени нагрева τ , а для нагрева необходимо $\tau < 2 \tau_{E_i}$, где τ_{E_i} — энергетическое время жизни ионов. В опыте по нагреву большой мощностью были повышены магнитное поле $B = 26 \text{ кГс}$ и ток $I_p = 35 \text{ кА}$. Это несколько увеличивает n^* и, кроме того, способствует лучшему удержанию быстрых ионов. Подбор оптимальной концентрации осуществлялся по потокам J_1 и J_2 нейтралей перезарядки с энергиями $E_1 = 1 \text{ кэВ}$ и $E_2 = 3.75 \text{ кэВ}$. Изменение потока J_1 характеризует рост температуры основной массы ионов, т. е. определяет нагрев; во время ВЧ импульса его увеличение стремились сделать максимальным. Поток J_2 подбирался минимальным в начале ВЧ импульса. В процессе ВЧ импульса по мере роста концентрации этот поток увеличивался, что, конечно, ухудшало условия нагрева из-за увеличения потерь энергии через быстрые ионы. В то же время при его полном подавлении в течение всего ВЧ импульса происходило уменьшение потока J_1 , что сказывалось на приросте температуры основной массы ионов. Наиболее оптимальной оказалась концентрация $\bar{n}_e = 1.4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, при которой был достигнут нагрев ионов от 120 до 320 эВ при вводе 120 кВт ВЧ мощности. При такой процедуре подбора оказалось возможным получить пропорциональность прироста температуры ΔT_i мощности нагрева в пределах 30–120 кВт (рис. 3).

Таким образом, наши эксперименты показали принципиальную возможность подобрать при заданной частоте греющего излучения концентрацию $n^* \approx (0.3-0.5) n_{\text{II}}$, оптимальную для осуществления нагрева в НГ диапазоне частот в центральной области токамака. При нагреве плазмы с заданной концентрацией необходимо подбирать частоту генератора. Из изложенного выше ясно, что греющая частота должна быть выше НГ частоты, а именно $f_0 \approx 1.5 f_{\text{НГ}}$. Точный расчет НГ частоты затруднен, так как она зависит от многих факторов, в частности от сорта и количества примесных ионов. Однако экспериментальным путем оптимальные условия можно подобрать в любом случае по потокам нейтралей перезарядки таким

образом, чтобы осуществить генерацию ионов заданного диапазона энергий в центре плазменного шнура. Реализации эффективного нагрева должно способствовать поддержание концентрации плазмы в процессе ВЧ импульса на одном уровне.

Список литературы

- [1] Голант В. Е., Федоров В. И. // Высоочастотные методы нагрева плазмы в тороидальных термоядерных установках. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 116—141.
- [2] Porkolab M., Schuss J., Takase Y. et al. // Proc. 2nd Joint Grenoble-Varenna International Symposium. Como, 1980. Vol. 1. P. 355—365.
- [3] Eckhardt D., Leuterer F., Söldner F. et al. // 12th European Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics. Budapest, 1985. Pt. 2. P. 678—680.
- [4] Budnikov V. N., Dyachenko V. V., Esipov L. A. et al. // 15th European Conf. on Controlled Fusion and Plasma Heating. Dubrovnik, 1988. Pt. III. P. 900—903.

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

Поступило в Редакцию
27 сентября 1988 г.

06; 12

Журнал технической физики, т. 59, в. 8, 1989

ДВОЙНОЕ ИЗОВАЛЕНТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ ВИСМУТОМ И ИНДИЕМ

В. В. Воробьева, О. В. Зушинская, С. В. Новиков, И. Г. Савельев, В. В. Чалдышев

В последние годы интенсивно исследуются возможности снижения концентрации остаточных фоновых примесей в эпитаксиальных слоях полупроводниковых соединений A^3B^5 путем изоваalentного легирования [1]. Показано, что при эпитаксии слоев арсенида галлия из растворов-расплавов в висмуте можно получить значительно более чистый материал, нежели из растворов-расплавов в галлии при тех же экспериментальных условиях [2—4]. Кроме того, известно, что легирование слоев арсенида галлия индием при выращивании из галлиевых растворов-расплавов также влияет на концентрацию фоновых примесей [5—7].

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования двойного легирования арсенида галлия висмутом и индием.

Слой арсенида галлия выращивались методом жидкофазной эпитаксии на полуизолирующих подложках GaAs с ориентацией (100) по технологии, аналогичной [4]. Температура начала эпитаксии 800 °С, интервал охлаждения 50 °С при скорости ~0.45 град/мин. В качестве растворителя при формировании раствора-расплава использовались либо чистый галлий, либо чистый висмут. Количество индия варьировалось в пределах, обеспечивающих получение слоев с содержанием InAs от 0 до 1.3 мол.%. При варьировании состава жидкой фазы ее масса поддерживалась постоянной во всех экспериментах.

Исследования электропроводности и эффекта Холла проводились при 77 и 300 К. Содержание индия в слоях (X_{InAs}^{Tb} , мол.%) определялось по энергетическому сдвигу спектра фотолюминесценции при 4.2 К относительно спектра, не легированного индием арсенида галлия $\Delta h\omega$ (мэВ) по соотношению [8] $X_{InAs}^{Tb} = \Delta h\omega / 15,9$. Спектры фотолюминесценции исследовались по методике [4] с разрешением не хуже 0.5 мэВ.

На рисунке, а представлены зависимости X_{InAs}^{Tb} в слоях, выращенных из галлиевого (2) и висмутового (1) растворов-расплавов, от содержания индия в жидкой фазе. В обоих случаях наблюдается линейная зависимость, характерная для примесей в соединениях A^3B^5 [9]. Из рисунка, а следует, что эффективный коэффициент сегрегации индия $K_{эфф}$ при выращивании из висмутового раствора-расплава (0.17—0.19) примерно на порядок превышает $K_{эфф}$ при выращивании из галлиевого растворителя (0.018—0.020). Причиной этого является существенно меньшее (практически на полтора порядка) количество Ga в жидкой фазе в случае висмутового раствора-расплава.

На рисунке, б представлены зависимости толщин полученных слоев от содержания индия. Толщина слоев, не легированных индием и выращенных из галлиевого раствора-расплава,