

Конструкция и принцип действия SiBH-диода

Т. Шютце (Th. Schütze)
Х. П. Файсль (H. P. Feisl)
Й. Бирманн (J. Biermann)

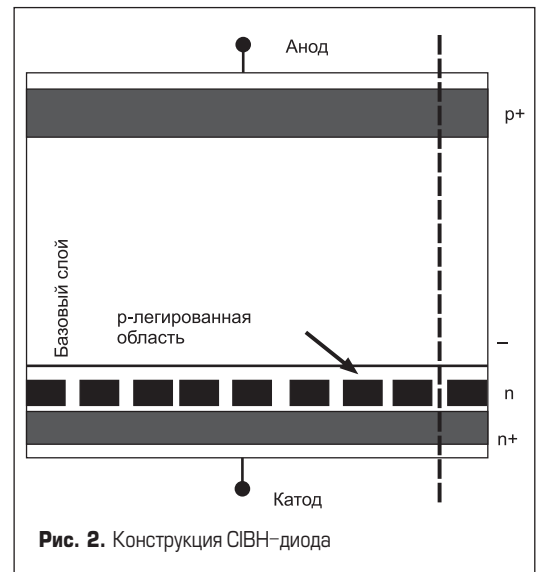
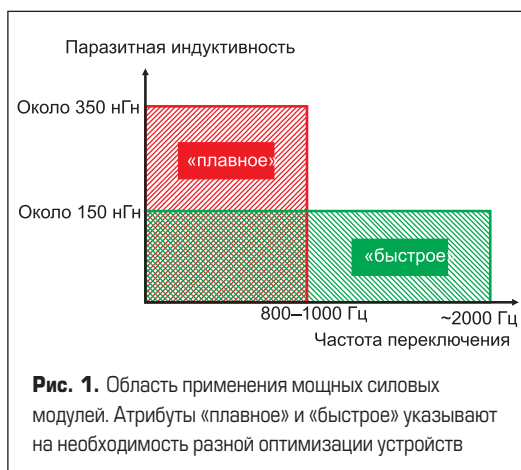
Представлена новая технология реализации вертикальной архитектуры обратных диодов, оптимизированная для применения при высоких частотах переключения. В целях минимизации потерь при выключении IGBT воплощена идея диода с контролируемой инжекцией дырок за границу $p-n$ -перехода (Controlled Injection of Backside Holes), или SiBH-диода.

Контролируемая инжекция дырок за границу $p-n$ -перехода позволяет уменьшить заряд, запасаемый в диоде, за счет сведения к минимуму толщины полупроводниковой пластины и снижения концентрации примесей в эмитирующий электрод обратной стороны, причем плавность переключения сохраняется даже при экстремальных условиях. Преимущества технологии SiBH в мощных схемах демонстрируются путем исследования рабочих характеристик высоковольтных модулей на номинальный ток 1500 А и сравнения с характеристиками современных обратных диодов.

Обоснование

Модули на номинальное напряжение 3300 В находят все более широкое применение. Недавно компания Infineon Technologies представила новый модуль FZ1500R33HE3[0], предназначенный для работы на умеренных частотах переключения при очень высоких паразитных индуктивностях. Но есть также схемы инверторов, требующие более высоких частот переключения при умеренных значениях паразитной индуктивности (рис. 1).

В последнем случае при разработке кристалла необходимо сосредоточиться на снижении потерь



на переключение, уделив особое внимание диоду. Носители запасенного заряда не только определяют потери в диоде при выключении, но и влияют на потери в IGBT при включении.

Снизить запасаемый в диоде заряд можно, уменьшив толщину устройства, понизив эффективность эмитирующего электрода обратной стороны и сократив время жизни носителей. Первые две из упомянутых мер отрицательно сказываются на плавности переключения диода. Чтобы сделать потери на переключение в модуле как можно меньшими, желательно иметь такой диод, который бы позволил в значительной степени уменьшить толщину устройства и снизить эффективность эмитирующего электрода обратной стороны, но при этом обеспечивал бы плавное переключение.

Конструкция SiBH-диода (рис. 2) обеспечивает повышенную плавность переключения при экстремальных условиях (например, высокое постоянное напряжение цепи постоянного тока, малый ток и большая паразитная индуктивность), но не ухудшает баланс между потерями на проводимость и потерями на переключение в умеренных условиях.

Конструкция и принцип действия SiBH-диода

Улучшение характеристик, которое обеспечивает SiBH-диод, достигается за счет внедрения утолщенных p -легированных слоев на стороне катода

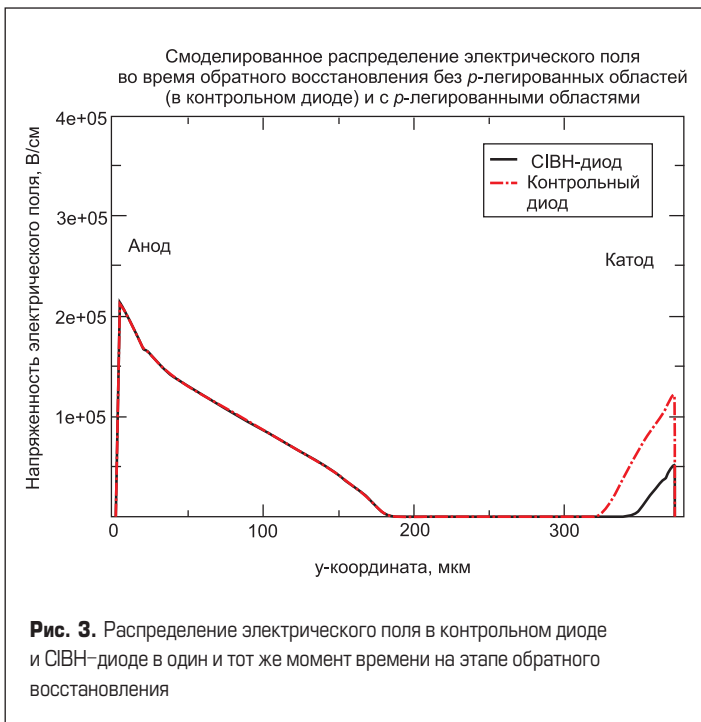


Рис. 3. Распределение электрического поля в контрольном диоде и SiVN-диоде в один и тот же момент времени на этапе обратного восстановления

перед n^+ -катодом. В процессе обратного восстановления утолщенные *p*-легированные области инжектируют дырки в область базы, повышая прочность и плавность переключения быстродействующих диодов.

На рис. 3 показано в разрезе электрическое поле между *p*-легированными областями вдоль пунктирной линии и сравнивается распределение электрического поля в контрольном диоде и SiVN-диоде в один и тот же момент времени на этапе обратного восстановления. Контрольный диод представляет собой современный управляемый по эмиттеру (EmCon) диод той же толщины. По рисунку можно видеть, что в SiVN-диоде удастся эффективно предотвратить образование высокого пика электрического поля на стороне катода за счет вышеупомянутой инжекции дырок. Плазма, представляющая свободные носители заряда, дольше сохраняется на стороне катода благодаря инжектированным таким образом дыркам. Поэтому уход плазмы из области базы замедляется, что обуславливает плавное обратное восстановление.

К моменту, когда вся плазма будет полностью экстрагирована из области базы и электрическое поле проникнет в зоны с высо-

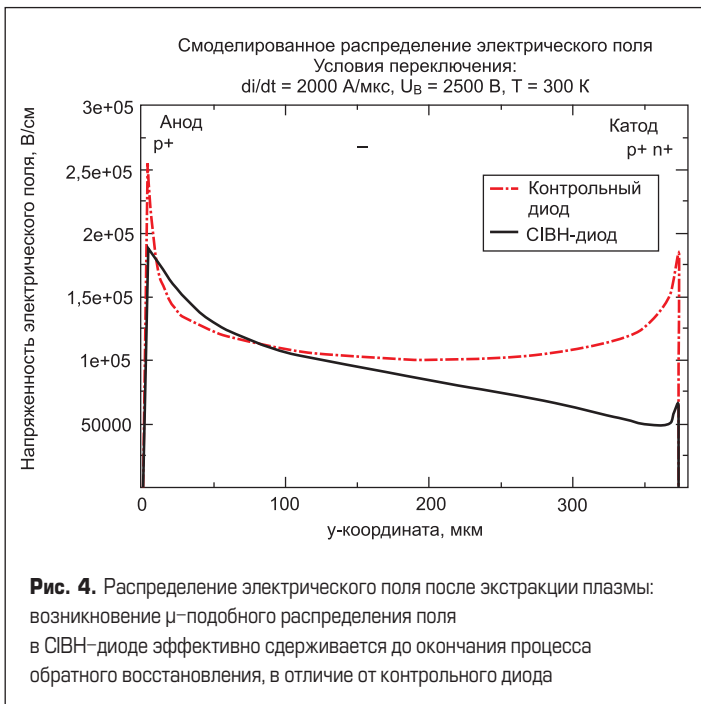


Рис. 4. Распределение электрического поля после экстракции плазмы: возникновение μ -подобного распределения поля в SiVN-диоде эффективно сдерживается до окончания процесса обратного восстановления, в отличие от контрольного диода

ким *p*-легированием, инжекция дырок резко возрастает, и резкое восстановление оказывается невозможным вплоть до очень высоких значений напряжения цепи постоянного тока, приложенного к диоду.

Более того, возникновение критического μ -подобного распределения поля, при котором электрическое поле высокой напряженности присутствует как на стороне анода, так и на стороне катода, сдерживается инжекцией дырок, в отличие от контрольного диода без *p*-легированных областей (рис. 4). Тем самым предотвращается положительная обратная связь с генерацией носителей заряда на стороне анода и катода, которая в ином случае может привести к разрушению диода. Именно это является причиной повышенной объемной прочности, препятствующей действию таких разрушительных механизмов, как «шнурование» тока.

Измерения

Исследуется высоковольтный модуль с 24 параллельно включенными диодами на номинальный ток 1500 А. В этом крупном модуле преимущества технологии SiVN становятся очевидными. На рис. 5 изображена осциллограмма восстановления SiVN-диода при экстремальных условиях переключения. Высокие значения паразитной емкости ($L_S = 320 \text{ нГн}$) и напряжения цепи постоянного тока ($V_{CE} = 2300 \text{ В}$) в сочетании с низкой температурой ($T = +25 \text{ }^\circ\text{C}$) и малым током ($I_{CE} = 300 \text{ А}$) ведут к резкому восстановлению и сильным пульсациям тока в современном быстродействующем диоде, оптимизированном для малых потерь на переключение.

Включенные параллельно SiVN-диоды отличаются очень плавным переключением без резкого восстановления даже при высоком напряжении цепи постоянного тока и при паразитной индуктивности, значительно превышающей требуемый уровень. Дополнительные носители заряда, образующиеся за счет инжекции дырок из структурированных *p*-легированных областей на обратной стороне кристалла устройства, можно наблюдать на осциллограмме тока восстановления (рис. 5).

Этому эффекту авторы дали название «режим динамического самозатухания» (Dynamic Self Damping Mode, DSMD). Он представляет собой самокоррекцию, при которой автоматически подавляются пульсации тока и обеспечивается достаточное количество носителей заряда для того, чтобы эффективно предотвратить резкое восстановление при экстремальных условиях переключения. Такая естественная защита от токовой отсечки позволяет применять данную конструкцию диода в устройствах с высокими значениями паразитной индуктивности.

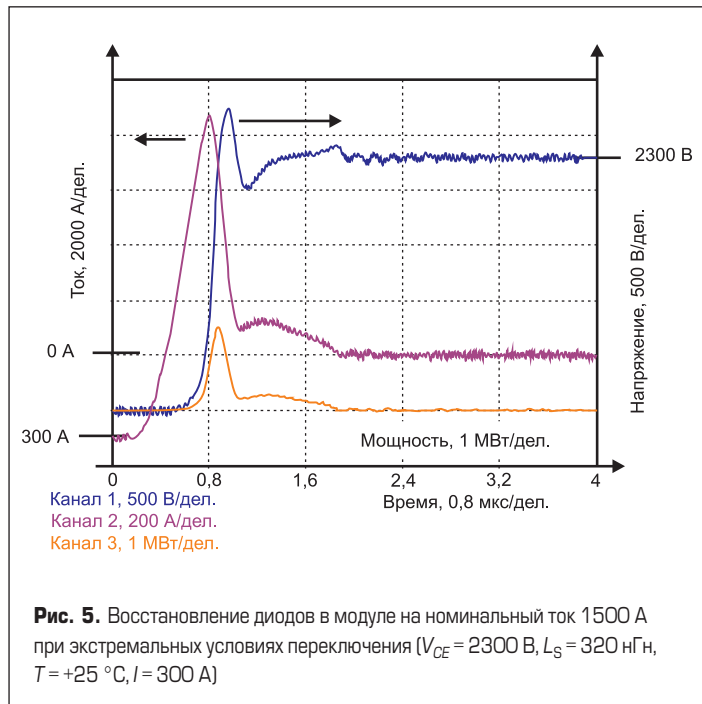


Рис. 5. Восстановление диодов в модуле на номинальный ток 1500 А при экстремальных условиях переключения ($V_{CE} = 2300 \text{ В}$, $L_S = 320 \text{ нГн}$, $T = +25 \text{ }^\circ\text{C}$, $I = 300 \text{ А}$)

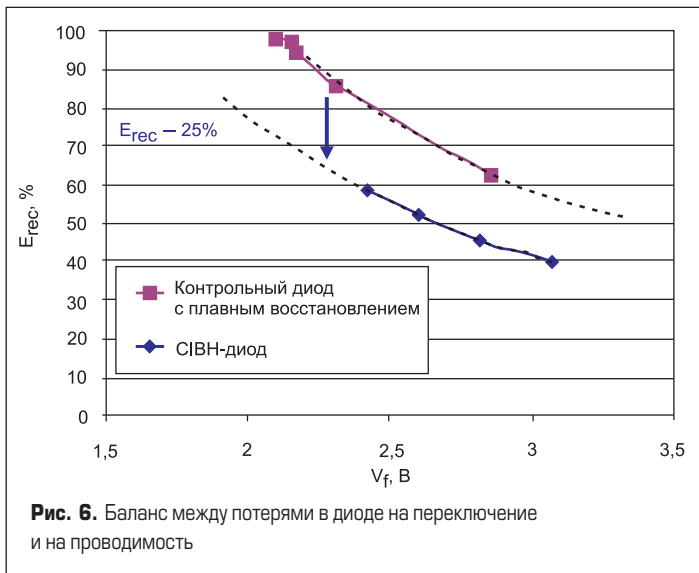


Рис. 6. Баланс между потерями в диоде на переключение и на проводимость

Преимущества тонкого SiBH-диода явственно видны на рис. 6, где он непосредственно сравнивается с контрольным диодом, имеющим высокие потери на обратное восстановление. Быстродействующий SiBH-диод демонстрирует такое же плавное переключение, как и контрольный диод с плавным восстановлением.

В инверторах с большой паразитной индуктивностью можно снизить потери на переключение в диоде на 25% при тех же потерях на проводимость. Это ведет к одновременному снижению потерь в IGBT при включении.

На рис. 7 показано восстановление диода в предельно жестких условиях, далеко превосходящих реальные условия эксплуатации. В случае модуля FZ1500R33NE3 удалось достичь пиковых значений мощности свыше 15,3 МВт без разрушения модуля. Испытания проводились при следующих условиях: $V_{CE} = 2400$ В, $I_{CE} = 2 \times I_{ном} = 3000$ А, температура модуля $T_j = +150$ °С. Эти результаты гарантируют большой запас относительно паспортных значений пиковой мощности.

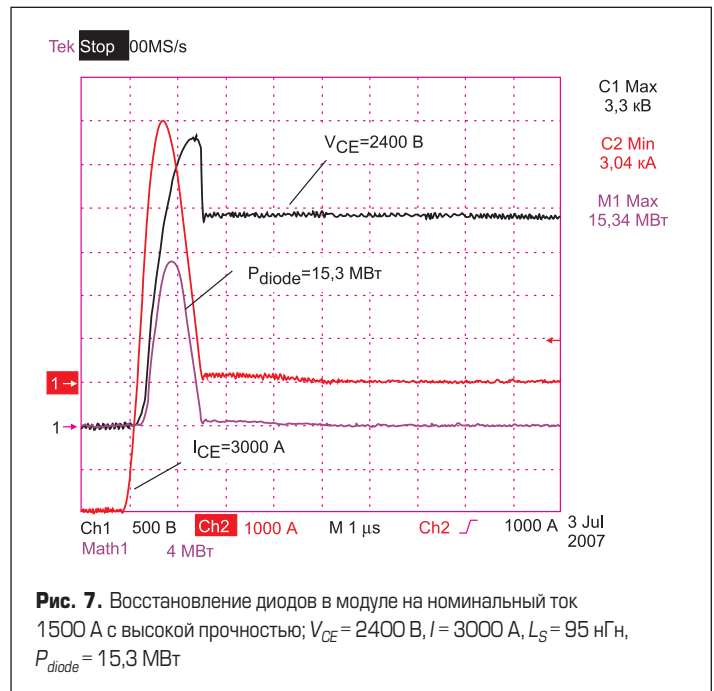


Рис. 7. Восстановление диодов в модуле на номинальный ток 1500 А с высокой прочностью; $V_{CE} = 2400$ В, $I = 3000$ А, $L_S = 95$ нГн, $P_{diode} = 15,3$ МВт

Выводы

Успешно запущен в производство модуль с SiBH-диодом. Такая конструкция диода ведет к значительному снижению потерь в диоде при выключении и потерь в IGBT при включении, но при этом по-прежнему обеспечивает весьма плавное переключение даже при экстремальных условиях благодаря режиму динамического самозатухания. Эта новая конструкция диода представляет собой прорыв в области разработки обратных диодов для современных мощных/высоковольтных инверторов. В сочетании с технологией заглубленных ячеек и ограничения поля компании Infineon Technologies она задает новые стандарты плавности переключения и минимизации общих потерь в мощных IGBT-модулях.