

Н. С. БАБЕНКО

(Новосибирск)

### МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДАТЧИКОМ ХОЛЛА

В практике физического эксперимента часто появляется необходимость в измерениях кратковременных импульсных магнитных полей, в том числе при одиночных импульсах, от единиц миллисекунд до десятых долей микросекунды и от единиц эрстед до 10—20 кЭ. При этом, как правило, выдвигается требование минимальных размеров датчика. Из существующих методов измерений [1] всем указанным требованиям удовлетворяют датчики Холла, в особенности пленочные из InAs, имеющие малые температурный коэффициент и э. д. с. неэквипотенциальности [2]. Однако при измерении быстроизменяющихся магнитных полей электромагнитные наводки на подводящие к датчику провода намного превышают полезный сигнал. Частотные спектры наводки и полезного сигнала совпадают, поэтому выделить сигнал известными методами не удается. Решить проблему разделения этих спектров для датчика Холла позволяет метод вспомогательной несущей, реализуемый при питании датчика напряжением, частота которого минимум на порядок превышает верхнюю граничную частоту спектра сигнала и помех. В этом случае спектр сигнала переходит в высокочастотную область, в то время как спектр помехи остается без изменений.

Метод высокочастотной несущей применялся и ранее для измерения импульсных магнитных полей с использованием ферромагнитного датчика сопротивления [3], который по ряду причин (см. [1]) может применяться только в специальных случаях. Реализация этого метода с помощью датчика Холла при достаточно высокой избирательности тракта усиления влияние наводок на датчик исключается и основными факторами, ограничивающими частотный и динамический диапазоны измеряемых полей, становятся погрешности, обусловленные нагревом датчика вихревыми токами и искажениями в нем магнитного поля. Остается также проблема исключения наводок на узлы магнитометра. Появляются высокочастотные наводки цепи питания в холловскую цепь свойственные только предлагаемому способу. Наконец, существуют технические трудности, связанные с расширением частотного диапазона полей и переходом в высокочастотную область и обусловленные необходимостью согласования и симметрирования цепей датчика, линейного детектирования сигнала, стабилизации параметров и калибровки прибора.

В то же время предлагаемый метод, кроме исключения наводок, имеет определенные дополнительные преимущества: снижается выпрям-

ляющий эффект контактов датчика, уровень его шумов, исключается влияние термо-э. д. с. Появляется возможность измерения постоянных, медленноменяющихся и импульсных магнитных полей в широком диапазоне частот одним и тем же прибором.

Для оценки возможностей и характеристик метода все указанные выше вопросы требуют детального анализа.

Подробный анализ ограничений частотного и динамического диапазонов измеряемых полей за счет искажения поля в датчике и нагрева его вихревыми токами приведен в [4]. В частности, из анализа следует, что при определенном выборе геометрии и электрических параметров датчика его частотный диапазон может простираться до 1—2 МГц без заметных (порядка 1%) вносимых погрешностей, а при однократных процессах существенно выше.

Электронные узлы измерителя поля для снижения наводок на их цепи должны быть удалены от объекта измерений, а это затрудняет питание датчика и передачу сигнала. Преодолеть эту трудность можно, применив, например двойные коаксиальные согласованные линии, которые затем переходят в сплетенные подводящие провода датчика. Такие линии одновременно исключают возможность высокочастотных излучений и позволяют реализовать двойную симметрию датчика: по цепи питания и холловской цепи, что в свою очередь упрощает компенсацию неэквивалентности.

Указанные выше меры не решают полностью проблему наводок от измеряемого поля и для выделения сигнала необходимо повышать избирательность тракта усиления. В частности, фильтры в выходной цепи датчика и последующий избирательный усилитель с двухтактным синхронным детектором (СД) позволяют уже полностью подавить наводки. Требование линейного детектирования в широком динамическом диапазоне сигналов при глубине модуляции больше 30%, наряду с требованием избирательности, также обуславливает необходимость синхронного детектирования. В настоящее время разработана конструкция СД [5], обеспечивающая нужную широкополосность при высокой несущей частоте сигнала.

Нагрузка датчика согласованными линиями вызывает дополнительную нелинейность его амплитудной характеристики [6] за счет эффекта изменения сопротивления и вторичного эффекта Холла. Величину нелинейности легко найти из эквивалентной электрической схемы датчика, в частности, при его питании от генератора напряжения она определяется из выражения для его коэффициента передачи

$$K_{\Pi} = \frac{R_d H r_n}{(r_n + r_x)(r_r + r_{rx}) + R_d R'_d H^2},$$

где  $R_d$  — постоянная Холла датчика;  $R'_d$  — постоянная вторичного эффекта Холла;  $r_n$ ,  $r_r$  — сопротивления нагрузки и генератора;  $r_x$ ,  $r_{rx}$  — выходное и входное сопротивление датчика соответственно.

Для датчиков из InAs и InSb нелинейность за счет вторичного эффекта, определяемая вторым членом знаменателя, не превышает 0,1%, а для Ge она может достигать 4%. Выбором датчика с малыми значениями  $r_x$  и  $r_{rx}$  удастся существенно уменьшить нелинейность, обусловленную изменением этих сопротивлений в магнитном поле. В предельном случае  $r_n = r_x$  и  $r_r = r_{rx}$ ; увеличение нелинейности по сравнению с разомкнутым на выходе датчиком порядка 1. Таким образом, при условии согласования датчика нелинейность (порядка 1%) также не ограничивает практически пределов его измерений.

Эффект выпрямления, как известно [7], с увеличением частоты уменьшается, и в этом смысле описываемый метод имеет также преимущества. По расчетам на частоте 25 МГц он не превышает 0,1%.

Шумы датчика в настоящее время мало изучены. По существующим данным [8] в датчике Холла различают три вида шумов: тепловой, дробовой и модуляционный («1/f шум»). Величина дробовых шумов увеличивается с уменьшением объема образца, однако на частотах  $\omega \sim \frac{1}{\tau_0}$ , где  $\tau_0 \leq 10^{-7}$  — среднее время жизни носителей, спектральная плотность падает обратно пропорционально квадрату частоты. При выполнении условия  $\omega \gg \frac{1}{\tau_0}$  относительная величина среднеквадратичного значения напряжения шумов, определяющаяся выражением

$$\sqrt{\overline{\Delta E^2}}/E_x \leq 10^{-4} \sqrt{p},$$

где  $p$  — вероятность связи носителя с ионизированным донором;  $p \ll 1$ , пренебрежимо мала. «1/f шум» является низкочастотным, верхняя граничная частота которого не превышает 100 кГц. Поскольку этот вид шумов является модуляционным, то вполне вероятно, что его спектр окажется внутри полосы пропускания тракта усиления. Расчеты показывают, что относительная величина э. д. с. этих шумов  $\sqrt{\overline{E_m^2}}/E_x$  постоянна:

$$\sqrt{\overline{E_m^2}}/E_x \leq 4b,$$

где  $b$  — константа для данного датчика. В отличие от других видов шумов «1/f шум» не ограничивает чувствительность метода, а вносит некоторую погрешность в измерения во всем динамическом диапазоне. Как правило,  $b \sim 10^{-4}$  и этим шумом также можно пренебречь.

Таким образом, уровень шумов при рассматриваемом методе, как и в индукционном, будет определяться тепловыми шумами датчика, которые, как известно, выражаются соотношением

$$\sqrt{\overline{u_z^2}} = \sqrt{4kTr\Delta f}.$$

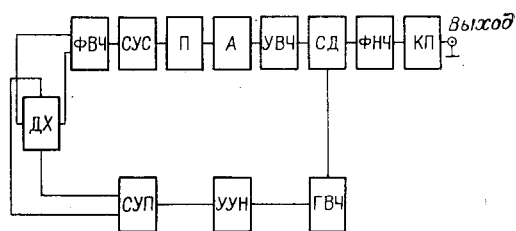
Экспериментальная проверка шумового напряжения пленочных датчиков из InAs подтвердила этот вывод.

При смещении частоты питающего тока в высокочастотную область возникает необходимость тщательного симметрирования датчика. В качестве радикального решения можно рекомендовать двойное симметрирование.

Калибровка прибора может осуществляться по постоянному магнитному полю, поскольку полоса частот измеряемых полей начинается от нуля. Однако из-за нестабильности нулевого уровня СД и несущей при калибровке могут быть внесены большие ошибки. Для их исключения необходимо на входе тракта усиления предусмотреть прерыватель, преобразующий сигнал в импульсный, повторяющийся. Преобразование упрощает процесс компенсации нулевого уровня и повышает точность измерений постоянных и медленно меняющихся магнитных полей.

На рисунке изображена блок-схема, реализующая описываемый способ. Стабилизированное напряжение генератора высокой частоты (ГВЧ) подается через симметрирующее устройство цепи питания (СУП) к токовым концам датчика Холла (ДХ). В качестве симметрирующих элементов в цепях датчика используются трансформаторы специальной конструкции [5] и двойные согласованные коаксиальные линии. Сигнал

с датчика через фильтры верхних частот (ФВЧ), исключающие перегрузку датчика и первого каскада усиления и симметрирующее устройство цепи сигнала (СУС), прерыватель (П), аттенюатор (А) подается на избирательный усилитель высокой частоты (УВЧ).



После детектирования синхронным детектором (СД), проводимость которого управляется напряжением генератора высокой частоты ГВЧ, и фильтрации (ФНЧ), напряжение сигнала через катодный повторитель КП поступает на регистрирующий прибор. Устройство установки нуля (УУН) обеспечивает компенсацию несущей и неэквипотенциальности.

Для экспериментальной проверки был смонтирован и испытан макет прибора. В качестве датчика использован пленочный датчик Холла  $1 \times 1,5 \text{ мм}^2$  из InAs чувствительностью  $10 \text{ мкВ/Э}$  с выходным сопротивлением порядка  $100 \text{ Ом}$ , входным —  $25 \text{ Ом}$  и температурным коэффициентом сопротивления  $0,01\% / ^\circ\text{C}$ . В качестве регистрирующего прибора использовался осциллограф с памятью. Полоса пропускания усилительного тракта  $5 \text{ МГц}$ . Частота генератора питания  $30 \text{ МГц}$ . Прибор располагался на расстоянии  $10 \text{ м}$  от датчика. Была снята частотная характеристика макета. Датчик помещался в воздушный зазор ферритового кольца. Ток обмотки кольца контролировался прибором типа Т-15. Поле одновременно измерялось индукционным датчиком с RC-интегратором. Неравномерность частотной характеристики в диапазоне до  $1 \text{ МГц}$  не превышала  $5\%$ . Амплитудная характеристика, снятая в поле постоянного магнита  $100 \text{ Э} - 10 \text{ кЭ}$  отклонялась от линейности не более чем на  $5\%$ . Аналогичные результаты были получены в импульсном поле до  $20 \text{ кЭ}$ . При этом получено совпадение формы импульсов от индукционного датчика (после интегрирования) и датчика Холла.

По сравнению с индукционным методом, нашедшим широкое применение в настоящее время, предлагаемый метод позволяет повысить точность измерений на низких и высоких частотах (порядка  $5\%$ ), уменьшить размеры датчика и производить калибровку прибора по постоянному полю. Обеспечивает измерение практически всего частотного спектра полей, встречающихся в ускорительной технике и плазменной диагностике, одним датчиком и одним прибором.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. С. Бабенко. Методы измерения переменных и импульсных магнитных полей.— ПТЭ, 1970, № 4.
2. С. Г. Шульман. Малогабаритный датчик Холла.— ПТЭ, 1969, № 1.
3. R. S. Hebbert, L. J. Schewe. Thin Film Magnetoresistance Magnetometer.— Rev. Scient. Instrum., 1966, 37, № 10.
4. Н. С. Бабенко. О частотной зависимости э. д. с. Холла при измерении переменных магнитных полей.— Автометрия, 1971, № 3.
5. Н. С. Бабенко, А. Н. Сударкин. Широкополосный синхронный детектор.— ПТЭ, 1969, № 3.
6. В. Хейнрихсен. Анализ работы нагруженного датчика Холла.— Труды Таллинского политехн. ин-та, серия А, № 213. Таллин, 1964.
7. Д. А. Поляков. К вопросу измерения напряженности магнитного поля при питании датчиком э. д. с. Холла переменным током.— Труды Рижского ин-та инж. гражданского флота им. ВЛКСМ, вып. 16. Рига, 1962.
8. А. Ван-дер-Зил. Флуктуационные явления в полупроводниках. Перевод с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.

Поступила в редакцию  
9 декабря 1970 г.